



⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑯ Offenlegungsschrift
⑯ DE 101 25 487 A 1

⑯ Int. Cl. 7:
G 03 F 7/20

DE 101 25 487 A 1

⑯ Aktenzeichen: 101 25 487.3
⑯ Anmeldetag: 23. 5. 2001
⑯ Offenlegungstag: 2. 1. 2003

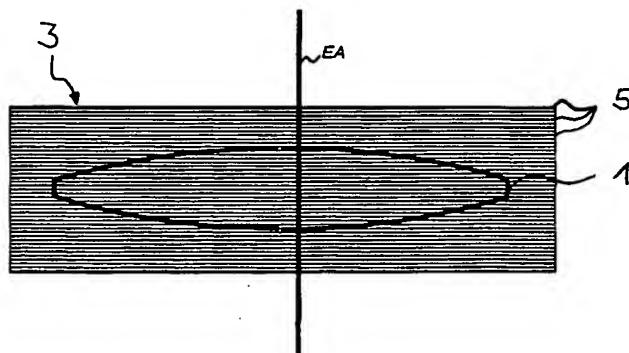
⑯ Anmelder:
Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

⑯ Erfinder:
Brunotte, Martin, 73431 Aalen, DE; Kaiser, Winfried, 73431 Aalen, DE; Gerhard, Michael, 73432 Aalen, DE; Maul, Manfred, 73434 Aalen, DE; Wagner, Christian, 73430 Aalen, DE; Krähmer, Daniel, Dr., 73431 Aalen, DE; Ulrich, Wilhelm, 73434 Aalen, DE; Enkisch, Birgit, 73447 Oberkochen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑯ Optisches Element, Projektionsobjektiv und Mikrolithographic-Projektionsbelichtungsanlage mit Fluoridkristall-Linsen

⑯ Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer Mehrzahl von Linsen, wobei mindestens eine Linse aus einem Fluorid-Kristall besteht. Diese Linse ist eine (100)-Linse mit einer Linsenachse, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Zur Reduzierung der Werte der Doppelbrechungsverteilung werden (100)-Linsen einer Gruppe gegeneinander verdreht. Dieses Verfahren ist auch auf (111)-Linsen anwendbar, deren Linsenachsen annähernd senkrecht auf den {111}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls stehen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen.



DE 101 25 487 A 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Projektionsobjektiv nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Derartige Projektionsobjektive sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung von Fluorid-Kristall-Linsen idealerweise die Linsenachsen senkrecht zu den {111}-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um die Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

[0003] Aus der Internet-Publikation "Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF₂" von John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist jedoch bekannt, daß Kalzium-Fluorid-Einkristalle auch nicht spannungsinduzierte, also intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Die dort präsentierten Messungen zeigen, daß bei Strahlabspreitung in der <110>-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von (6.5 ± 0.4) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm, von (3.6 ± 0.2) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 193.09$ nm und von (1.2 ± 0.1) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 253.65$ nm für Kalzium-Fluorid auftritt. Bei einer Strahlabspreitung in der <100>-Kristallrichtung und in der <111>-Kristallrichtung weist Kalzium-Fluorid dagegen keine intrinsische Doppelbrechung auf, wie dies auch von der Theorie vorhergesagt wird. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit stark richtungsabhängig und nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge deutlich zu.

[0004] Auf Grund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle gelten in den folgenden Ausführungen Aussagen zur Strahlabspreitung in <110>-Kristallrichtung auch immer für die Strahlabspreitung in <101>, <10̄1>, <10̄1>-<011>-, <011>, <011>-, <110>, <110>-, und <110>-Kristallrichtung. Gleiches gilt auch für Aussagen zur Strahlabspreitung in <100>-Kristallrichtung, <010>-Kristallrichtung und <001>-Kristallrichtung, beziehungsweise den Kristallrichtungen, bei denen der Index "1" negatives Vorzeichen hat, also "1". Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen auf die entsprechende Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung <100> in Richtung der Flächennormalen der Kristallebene {100}. Aussagen zu den auf Grund der Kristallsymmetrie äquivalenten Kristallrichtungen, die sich in der Regel nur durch Permutationen der Ziffern "0", "1" und "1" ergeben, werden deshalb nicht explizit aufgeführt, sondern sollten implizit mitgelesen werden, wenn zu einer dieser Kristallrichtungen, beziehungsweise Kristallebene Feststellungen getroffen werden.

[0005] Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der Patentanmeldung PCT/EP 00/13184 der Anmelderin und den darin zitierten Schriften bekannt. Die Ausführungsbeispiele dieser Anmeldung zeigen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0.8 und 0.9, bei einer Betriebswellenlänge von 193 nm sowie 157 nm.

[0006] Die Drehung von Linsenelementen zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten ist auch in der Patentanmeldung "Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren" mit dem Aktenzeichen des Anmelders 01055P und dem Einreichungstag 15.05.2001 beschrieben. Der Inhalt dieser Anmeldung soll auch Teil der vorliegenden Anmeldung sein.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es, Projektionsobjektive für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, bei denen der Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung minimiert ist.

[0008] Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Projektionsobjektiv gemäß Anspruch 1, 17, 26 und 49, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 35, einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 36 und einem Verfahren zur Reduzierung der Doppelbrechung gemäß Anspruch 37, 38 und 39.

[0009] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

[0010] Um den Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei Linsen aus Fluorid-Kristall die Linsenachsen so auszurichten, daß sie mit der <100>-Kristallrichtung bis auf eine maximale Abweichung von 5° zusammenfallen. Dabei müssen nicht alle Fluorid-Kristall-Linsen des Projektionsobjektives eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen Linsen, bei denen die Linsenachsen senkrecht auf den {100}-Kristallebenen stehen, werden im Folgenden auch als (100)-Linsen bezeichnet. Die Ausrichtung der Linsenachse in <100>-Kristallrichtung hat den Vorteil, dass sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung, der sich bei Lichtabspreitung in <110>-Kristallrichtung ergibt, erst bei höheren Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen bemerkbar als für eine Ausrichtung der Linsenachse in <111>-Kristallrichtung. Unter Öffnungswinkel versteht man in diesem Zusammenhang den Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der optischen Achse außerhalb einer Linse und zwischen dem Lichtstrahl und der Linsenachse innerhalb einer Linse. Erst wenn die Öffnungswinkel in den Bereich des Winkels zwischen der <100>-Kristallrichtung und der <110>-Kristallrichtung kommen, spüren die entsprechenden Lichtstrahlen den Einfluss der Doppelbrechung. Der Winkel zwischen der <110>-Kristallrichtung und der <100>-Kristallrichtung beträgt dabei 45°. Wäre die Linsenachse dagegen in <111>-Kristallrichtung ausgerichtet, so würde sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung schon bei kleineren Öffnungswinkeln bemerkbar machen, da der Winkel zwischen der <110>-Kristallrichtung und der <111>-Kristallrichtung nur 35° beträgt.

[0011] Wird die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechung beispielsweise durch das Herstellverfahren des Fluorid-Kristalls oder die mechanische Beanspruchung des Linsen z hervorgerufen, so können die offensichtlichen Lösungsansätze selbstverständlich ebenfalls zur Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung angewendet werden.

[0012] Die Linsenachse ist dabei beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Linsenachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Als Linsen kommen beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen sowie Korrekturplatten mit Freiformkorrekturflächen in Frage. Auch Planplatten werden als Linsen angesehen, sofern sie im Strahlengang des Projektionsobjektives angeordnet sind. Die Linsenachse einer Planplatte steht dabei senkrecht auf den planen Linsenoberflächen.

[0013] Vorzugsweise handelt es sich jedoch bei den Linsen um rotationssymmetrische Linsen.

[0014] Projektionsobjektive weisen eine optische Achse auf, welche von der Objektebene zur Bildebene verläuft. Vorzugsweise sind die (100)-Linsen zentriert um diese optische Achse aufgebaut, so dass auch die Linsenachsen mit der optischen Achse zusammenfallen.

[0015] Bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen, insbesondere größer 0.7, treten innerhalb der (100)-Linsen Öffnungswinkel auf, die größer als 25° , insbesondere größer als 30° sind. Gerade bei diesen großen Öffnungswinkeln kommt die Erfahrung zum Tragen, die Linsenachsen in <100>-Kristallrichtung zu orientieren. Während die Linsenachsen in <111>-Kristallrichtung orientiert, so würden die Lichtstrahlen mit Öffnungswinkeln größer als 25° , insbesondere größer als 30° deutlicher den störenden Einfluß der Doppelbrechung spüren, welche in diesem Fall für Öffnungswinkel von 35° maximal ist. 5

[0016] Da andererseits der störende Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung bei einem Öffnungswinkel von 45° maximal werden kann, ist es vorteilhaft, das Projektionsobjektiv so auszulegen, dass alle Öffnungswinkel der Lichtstrahlen kleiner 45° sind, insbesondere kleiner gleich 10

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

sind, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und n_{FK} die Brechzahl des Fluorid-Kristalls. Der Ausdruck 15

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

20

gibt dabei den Öffnungswinkel an, welcher der bildseitigen numerischen Apertur innerhalb einer Fluorid-Kristall-Linse entspricht, wenn an der Grenzfläche keine Brechung stattfindet. Dies wird erreicht, indem die Linsen, die nahe an der Bildebene angeordnet sind, sammelnde Linsenflächen, plane Linsenflächen oder höchstens leicht zerstreuende Linsenflächen aufweisen, wenn in Lichtrichtung nach der zerstreuenden Linsenfläche eine stärker sammelnde Linsenfläche folgt. 25

[0017] Große Öffnungswinkel treten hauptsächlich bei Linsen in der Nähe von Feldebenen, insbesondere der Bildebene auf. Die (100)-Linsen sollten deshalb vorzugsweise im Bereich der Feldebenen eingesetzt werden. Der Bereich, in dem die (100)-Linsen eingesetzt werden sollten, lässt sich über das Verhältnis der Linsendurchmesser zum Durchmesser der Blende bestimmen. So beträgt der Linsendurchmesser der (100)-Linsen vorzugsweise maximal 85%, insbesondere maximal 80% des Blendendurchmessers. 30

[0018] Bei Projektionsobjektiven treten die größten Öffnungswinkel in der Regel in dem der Bildebene am nächsten gelegenen Linse auf. Deshalb wird vorzugsweise bei dieser Linse die Linsenachse in Richtung der <100>-Kristallrichtung ausgerichtet. 35

[0019] Die intrinsische Doppelbrechung ist dabei nicht nur vom Öffnungswinkel eines Lichtstrahls, sondern auch vom Azimuthwinkel des Lichtstrahls abhängig. Der Azimuthwinkel eines Lichtstrahls wird dabei folgendermaßen bestimmt: Ist die Linsenachse beispielsweise in <100>-Kristallrichtung orientiert, so wird der Lichtstrahl in die {100}-Kristallebene projiziert. Ebenso werden die Richtungsvektoren der <101>-, <110>-, <101>- und <110>-Kristallrichtungen mit maximaler intrinsischer Doppelbrechung in die {100}-Kristallebene projiziert. Der Azimuthwinkel wird nun zwischen dem projizierten Lichtstrahl und dem projizierten Richtungsvektor der <110>-Kristallrichtung bestimmt. Die entsprechenden Definitionen gelten natürlich auch für die Fälle, bei denen die Linsenachse in der <010>-Kristallrichtung oder in der <001>-Kristallrichtung orientiert ist. Die intrinsische Doppelbrechung einer einzelnen Linse weist eine vierzählige Azimuthal-Symmetrie auf, wenn die Linsenachse in <100>-Kristallrichtung orientiert ist. Eine maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich dabei für Azimuthwinkel von 0° , 90° , 180° und 270° , während sie für Winkel von 45° , 135° , 225° und 315° nahezu verschwindet. Die Winkelabhängigkeit der intrinsischen Doppelbrechung lässt sich durch die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ darstellen, die sich für ein Strahlenbüschel ergibt, das von einem Objektpunkt in der Objektebene ausgeht. Jeder Strahl des Strahlenbüschels weist dabei bezüglich der optischen Achse des Projektionsobjektives den Öffnungswinkel θ und bezüglich einer Bezugsrichtung in der Objektebene den Azimuthwinkel α auf. Die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ wird dabei in der Bildebene bestimmt, nachdem das Strahlbüschel durch das gesamte Projektionsobjektiv propagiert wurde. Dabei werden für jeden Strahl des Strahlbüschels die optischen Wegunterschiede 40

von zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen in jeder Linse bestimmt und addiert. Die Summe der optischen Wegunterschiede wird anschließend durch die Summe der Strahlwege innerhalb der Linsen für den jeweiligen Strahl dividiert. Die daraus resultierenden Werte ergeben die Doppelbrechungsverteilung. Die Doppelbrechungsverteilung kann dabei aber auch für den Einfluß einzelner Linsen angegeben werden, indem die optischen Wegunterschiede für die einzelnen Linsen ausgewertet werden. Werden in einem Projektionsobjektiv mehrere (100)-Linsen eingesetzt, so ist 45

es vorteilhaft, wenn die (100)-Linsen gegeneinander um die optische Achse verdreht angeordnet sind. Dadurch lässt sich vermeiden, dass sich der störende Einfluss durch die intrinsische Doppelbrechung additiv überlagert, wenn die (100)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden. Durch die verdrehte Anordnung der (100)-Linsen kann die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ betragsmäßig wesentlich reduziert werden. So kann der maximale Doppelbrechungswert um bis zu 50

20%-, insbesondere um bis zu 25% im Vergleich zu einem gleich orientierten Einbau der (100)-Linsen reduziert werden. 55

[0020] Durch den verdrehten Einbau der (100)-Linsen kann insbesondere die Abhängigkeit vom Azimuthwinkel α deutlich reduziert werden, so dass sich eine nahezu rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilung ergibt. 60

[0021] Die gegenseitige Orientierung der (100)-Linsen wird über die Drehwinkel β definiert, die den Winkel zwischen zwei Bezugsrichtungen angeben. Die Bezugsrichtung einer (100)-Linse steht dabei senkrecht auf der Linsenachse und weist in eine Hauptkristallrichtung. Die Hauptkristallrichtungen für die (100)-Linsen sind die <010>-Kristallrichtung, die <001>-Kristallrichtung, die <010>-Kristallrichtung oder die <001>-Kristallrichtung. Zur Reduzierung der Doppelbrechung werden vorteilhafterweise eine Gruppe von (100)-Linsen betrachtet, wobei die (100)-Linsen gegeneinander derart verdreht sind, daß sich für je zwei (100)-Linsen einer Gruppe der Drehwinkel folgendermaßen ergibt: 65

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

5 wobei n die Anzahl der (100)-Linsen einer Gruppe und m eine natürliche Zahl darstellt. Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise 45° , beziehungsweise $135^\circ, 225^\circ \dots$ Da die (100)-Linsen eine vierzählige Azimuthal-Symmetrie aufweisen, ist die Korrektur der Doppelbrechung invariant gegenüber Drehungen der (100)-Linsen um 90° . Dieser Freiheitsgrad sowie die Toleranzangabe von $\pm 5^\circ$ lässt sich zur klassischen Justage des Projektionsobjektives einsetzen, um beispielsweise nicht rotationssymmetrische Störungen zu korri-

10 gieren.
 [0022] Die Linsen einer Gruppe werden beispielsweise dadurch bestimmt, dass ein äußerster Aperturstrahl eines Strahlenbüschels innerhalb dieser Linsen jeweils ähnliche Öffnungswinkel aufweist, wobei vorteilhafterweise die Öffnungswinkel des äußersten Aperturstrahls innerhalb dieser Linsen größer 15° , insbesondere größer 20° sind. Als äußerster Aperturstrahl wird ein Strahl bezeichnet, der von einem Objektpunkt ausgeht, dessen Strahlhöhe in der Blendenebene 15 dem Radius der Blende entspricht und der somit in der Bildebene einen Winkel gemäß der bildseitigen numerischen Apertur aufweist. Die äußersten Aperturstrahlen werden deshalb zur Definition der Gruppen herangezogen, weil sie üblicherweise innerhalb der Linsen die größten Öffnungswinkel aufweisen und damit die größte Störung durch die Doppelbrechung erfahren. Die Bestimmung der optischen Wegdifferenz für zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen für die äußersten Aperturstrahlen ermöglicht somit Aussagen über die maximale Störung einer Wellenfront 20 durch die Doppelbrechung.

[0023] Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in diesen Linsen jeweils einen gleichen Strahlweg zurückgelegt. Durch diese Maßnahmen ergeben sich eine gute Kompensation der Doppelbrechungsbeiträge, die von den einzelnen Linsen einer Gruppe hervorgerufen werden.

[0024] Vorteilhaft für eine optimale Kompensation der Linsen einer Gruppe ist es, wenn der äußerste Aperturstrahl in 25 jeder dieser Linsen ähnlich große optische Wegunterschiede zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erfährt. Die elektromagnetischen Feldkomponenten definieren dabei den Polarisationszustand des Strahls.

[0025] Im Fall zweier planparalleler benachbarter Linsen erhält man eine nahezu rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilung durch Drehung der beiden Linsen. Auch bei Linsen mit gekrümmten Oberflächen lässt sich durch geschickte Auswahl der Linsen oder durch eine entsprechende Wahl der Dicken und der Radien der Linsen bereits durch 30 Drehen von zwei (100)-Linsen eine näherungsweise rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilung.

[0026] Besonders effektiv wird die Drehung der einzelnen (100)-Linsen gegeneinander dann, wenn die (100)-Linsen 35 benachbart angeordnet sind. Besonders vorteilhaft ist es, eine Linse in zwei Teile aufzuteilen und die Linsenhälften gegeneinander verdreht anzusprengen. Eine weitere vorteilhafte Ausführungsform sieht die Herstellung einer Linse aus einem Materialblock vor, der zuvor durch das Ansprengen von zwei um 60° verdrehten (111)-Platten und von zwei um 45° verdrehten (100)-Platten hergestellt wurde.

[0027] Bei einem Projektionsobjektiv mit einer Vielzahl von Linsen ist es günstig, mehrere Gruppen von (100)-Linsen zu bilden. Dabei sind die (100)-Linsen einer Gruppe derart gedreht, daß die Doppelbrechungsverteilung der Gruppe einen vom Azimuthwinkel nahezu unabhängigen Verlauf aufweist.

[0028] Das Prinzip der Reduzierung der Doppelbrechung durch das gegenseitige Verdrehen von (100)-Linsen lässt 40 sich auch vorteilhaft bei Fluorid-Kristall Linsen einsetzen, deren Linsenachsen bis auf eine Abweichung von 5° senkrecht auf den {111}-Kristallebenen oder dazu äquivalenten Kristallebenen, also beispielsweise den {111}-Kristallebenen oder den {111}-Kristallebenen, stehen. Diese Linsen werden im Folgenden als (111)-Linsen bezeichnet.

[0029] Die intrinsische Doppelbrechung einer einzelnen Linse weist eine dreizählige Azimuthal-Symmetrie auf, wenn 45 die Linsenachse in <111>-Kristallrichtung orientiert ist. Eine maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich dabei für Azimuthwinkel von $0^\circ, 120^\circ$ und 240° , während sie für Winkel von $60^\circ, 180^\circ$ und 300° verschwindet. Für das Verdrehen von (111)-Linsen gelten die entsprechenden Aussagen, welche für das Verdrehen von (100)-Linsen getroffen wurden, bis auf die Vorgabe von idealen Drehwinkeln γ , wenn mit einer Gruppe von (111)-Linsen die Doppelbrechung reduziert werden soll. Für je zwei (111)-Linsen dieser Gruppe ist der Drehwinkel folgendermaßen gegeben:

$$\beta = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 8^\circ,$$

50 wobei k die Anzahl der (111)-Linsen einer Gruppe und 1 eine natürliche Zahl darstellt. Umfasst die Gruppe zwei (111)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise 60° , beziehungsweise $180^\circ, 300^\circ \dots$

[0030] Während nun die Doppelbrechungsverteilung durch das gegenseitige Verdrehen von (100)-Linsen, beziehungsweise das gegenseitige Verdrehen von (111)-Linsen nahezu unabhängig vom Azimuthwinkel ist, kann der absolute Wert der Doppelbrechungsverteilung dadurch deutlich reduziert werden, dass das Projektionsobjektiv sowohl eine Gruppe von (100)-Linsen als auch eine Gruppe von (111)-Linsen aufweist. Dies ist möglich, weil die Doppelbrechung nicht nur 60 einen absoluten Wert, sondern auch eine Richtung aufweist. Betrachtet man nun die (100)-Doppelbrechung, welche durch eine Gruppe von (100)-Linsen mit optimiertem Drehwinkel hervorgerufen wird, und die (111)-Doppelbrechung, welche durch eine Gruppe von (111)-Linsen mit optimiertem Drehwinkel hervorgerufen wird, so ist die Richtung der (100)-Doppelbrechung nahezu um 90° verdreht zur Richtung der (111)-Doppelbrechung. Sind die Absolutwerte der (100)-Doppelbrechung ähnlich groß wie die Absolutwerte der (111)-Doppelbrechung, so kompensieren sich die beiden 65 Doppelbrechungsverteilungen nahezu vollständig. Durch den gleichzeitigen Einsatz einer Gruppe mit (100)-Linsen und einer Gruppe mit (111)-Linsen ist es deshalb möglich, den Maximalwert der Doppelbrechung derart zu reduzieren, dass er nur noch 20% des Maximalwertes der Doppelbrechung beträgt, der sich ergeben würde, wenn nur (111)-Linsen oder nur (100)-Linsen insbesondere für Linsen mit hohen Öffnungswinkeln eingesetzt werden würden.

[0031] Als Material für die Linsen wird in Projektionsobjektiven vorzugsweise Kalzium-Fluorid eingesetzt, da Kalzium-Fluorid bei gemeinsamem Einsatz mit Quarz bei einer Arbeitswellenlängen von 193 nm sich zur Farbkorrektur besonders eignet, beziehungsweise bei einer Arbeitswellenlänge von 157 nm eine ausreichende Transmission bereitstellt. Aber auch für die Fluorid-Kristalle Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid gelten die hier getroffenen Aussagen, da es sich um Kristalle vom gleichen kubischen Kristall-Typ handelt.

5

[0032] Der störende Einfluss der intrinsische Doppelbrechung macht sich besonders dann bemerkbar, wenn die Lichtstrahlen innerhalb der (100)-Linsen oder (111)-Linsen große Öffnungswinkel aufweisen. Dies ist für Projektionsobjektive der Fall, die eine bildseitige numerische Apertur aufweisen, die größer als 0,7, insbesondere größer 0,8 ist.

10

[0033] Die intrinsische Doppelbrechung nimmt mit abnehmender Arbeitswellenlänge deutlich zu. So ist die intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193 nm mehr als doppelt so groß, bei einer Wellenlänge von 157 nm mehr als fünfmal so groß wie bei einer Wellenlänge von 248 nm. Die Erfindung lässt sich deshalb besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200 nm, insbesondere kleiner 160 nm aufweisen.

[0034] Bei dem Projektionsobjektiv kann es sich dabei um ein rein refraktives Objektiv handeln, das aus einer Vielzahl von rotationssymmetrisch um die optische Achse angeordneten Linsen besteht.

15

[0035] Aber auch bei Projektionsobjektiven vom katadioptrischen Objektivtyp verbessert sich die Abbildungsleistung, wenn die Linsen mit großen Öffnungswinkel der Lichtstrahlen derart orientiert sind, dass die Symmetrieachsen der Linsen in <100>-Kristallrichtung weisen, und/oder bei Gruppen von (100)- oder (111)-Fluorid-Kristall-Linsen die Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind.

20

[0036] Derartige Projektionsobjektive lassen sich vorteilhaft in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen einsetzen, die ausgehend von der Lichtquelle ein Beleuchtungssystem, ein Masken-Positioniersystem, eine Struktur tragende Maske, ein Projektionsobjektiv, ein Objekt-Positionierungssystem und ein Licht empfindliches Substrat umfassen.

25

[0037] Mit dieser Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Halbleiter-Bauelemente herstellen.

30

[0038] Die Erfindung stellt auch geeignete Verfahren bereit, um die Doppelbrechung deutlich zu reduzieren. Das Verfahren wird dabei bei einem Projektionsobjektiv angewandt, das mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen in <100>-Orientierung oder in <111>-Orientierung umfasst. Von diesen Linsen ist dabei weiterhin die Lage der Bezugsrichtungen bekannt, die durch die auf die <100>-Kristallrichtung, beziehungsweise die <111>-Kristallrichtung senkrecht stehenden Hauptkristallrichtungen gegeben sind. Das Verfahren nutzt dabei die erfinderische Erkenntnis aus, dass sich durch Drehen der Fluorid-Kristall-Linsen um die optische Achse die Maximalwerte der Doppelbrechungsverteilung wesentlich reduzieren lassen. Durch geeignete Simulationsmethoden wird dabei ein von einem Objektpunkt ausgehendes Strahlenbüschel durch ein Projektionsobjektiv propagiert und auf Grund der bekannten optischen Eigenschaften der Fluorid-Kristall-Linsen die Doppelbrechungsverteilung in der Bildebene bestimmt. In einem Optimierungsschritt werden nun die Fluorid-Kristall-Linsen so lange gedreht, bis die Doppelbrechung tolerierbare Werte aufweist. Der Optimierungsschritt kann dabei auch weitere Randbedingungen wie beispielsweise die Kompensation von nicht rotationssymmetrischen Linsenfehlern durch Linsendrehen berücksichtigen, welche die Abbildungsleistung des Objektives insgesamt verbessern. Durch diesen Optimierungsschritt kann der Maximalwert der Doppelberechnung um bis zu 30%, insbesondere bis zu 50% reduziert werden im Vergleich zu einem Projektionsobjektiv, bei dem die Fluorid-Kristall-Linsen gleich orientiert angeordnet sind. Das Optimierungsverfahren kann auch einen Zwischenschritt aufweisen. In diesem Zwischenschritt werden aus den Fluorid-Kristall-Linsen Gruppen gebildet mit Linsen, die jeweils für einen äußersten Aperturstrahl einen ähnlichen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erzeugen. In dem nachfolgenden Optimierungsschritt werden dann die Linsen nur innerhalb der Gruppen gedreht, um die Doppelbrechung zu reduzieren.

35

[0039] Das beschriebene Verfahren lässt sich besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn neben einer oder mehrerer Gruppen von (100)-Linsen eine oder mehrere Gruppen von (111)-Linsen in dem Projektionsobjektiv eingesetzt wird, beziehungsweise werden. Der Optimierungsschritt sieht dann vor, dass zunächst die (100)-Linsen derart gedreht werden, dass die durch diese Linsen hervorgerufene (100)-Doppelberechnung reduziert wird, und dann die (111)-Linsen derart gedreht werden, dass die durch diese Linsen hervorgerufene (111)-Doppelberechnung reduziert wird. Die Verteilung der Fluorid-Kristall-Linsen auf Linsen mit (100)-Orientierung und (111)-Orientierung muß bei der Optimierung so erfolgen, daß sich die resultierende (100)-Doppelbrechung und die resultierende (111)-Doppelbrechung weitgehend kompensieren.

40

[0040] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

45

[0041] Fig. 1 zeigt einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block senkrecht zu den {100}-Kristallebenen zusammen mit einer Linse eines Projektionsobjektives in schematischer Darstellung;

50

[0042] Fig. 2A-B zeigen je eine planparallele Linse in (100)- und in (111)-Orientierung in einer schematischen dreidimensionalen Darstellung;

55

[0043] Fig. 3 zeigt ein Koordinatensystem zur Definition des Öffnungswinkels und des Azimuthalwinkels;

60

[0044] Fig. 4A-D zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (100)-Linsen in verschiedenen Darstellungen;

[0045] Fig. 5A-D zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen Darstellungen;

[0046] Fig. 6 zeigt den Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs;

65

[0047] Fig. 7 zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs; und

66

[0048] Fig. 8 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in schematischer Darstellung.

[0049] Fig. 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block 3. Der Schnitt ist so gewählt, dass die {100}-Kristallebenen 5 als einzelne Linien zu sehen sind, so dass die {100}-Kristallebenen 5 sich senkrecht zur Papierebene befinden. Der Fluorid-Kristall-Block 3 dient als Ausgangsmaterial für die (100)-Linse 1. In diesem Beispiel ist die (100)-Linse 1 eine Bikonvex-Linse mit der Linsenachse EA, die zugleich Symmetrieachse der Linse ist. Die Linse 1 wird nun so aus dem Fluorid-Kristall-Block herausgearbeitet, daß die Linsenachse EA senkrecht auf den {100}-Kristallebenen steht.

65

[0050] In Fig. 2A wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung

mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in <100>-Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 201 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in <100>-Kristallrichtung. Neben der <100>-Kristallrichtung sind auch die <101>, <110>, <101> und <110>-Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch vier "Keulen" 203 dargestellt, deren Oberflächen den

5 Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den <101>, <110>, <101> und <110>-Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 45° und einem Azimuthwinkel von 0°, 90°, 180° und 270°. Für Azimuthwinkel von 45°, 135°, 225° und 315° ergeben sich jeweils minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

10 [0051] In Fig. 2B wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in <111>-Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 205 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in <111>-Kristallrichtung. Neben der <111>-Kristallrichtung sind auch die <011>, <101> und <110>-Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die

15 intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch drei "Keulen" 207 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den <011>, <101> und <110>-Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 35° und einem Azimuthwinkel von 0°, 120° und 240°. Für Azimuthwinkel von 60°, 180° und 300° ergeben sich jeweils minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

20 [0052] Die Definition von Öffnungswinkel θ und Azimuthwinkel α ist in Fig. 3 dargestellt. Für das Beispiel von Fig. 2 zeigt dabei die z-Achse in <100>-Kristallrichtung, die x-Achse in (010)-Kristallrichtung.

[0053] Aus der zitierten Internetpublikation ist bekannt, dass Messungen bei Strahlabspreitung in der <110>-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von (6.5 ± 0.4) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm für Kalzium-Fluorid ergeben haben. Mit diesem Messwert als Normierungsgröße kann die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\theta, \alpha)$ in Abhängigkeit der Kristallstruktur theoretisch abgeleitet werden. Dazu werden die aus der Kristalloptik bekannten Formalismen zur Berechnung der Indexellipsoide in Abhängigkeit der Strahlrichtung herangezogen. Die theoretischen Grundlagen sind beispielsweise im "Lexikon der Optik", Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1999 unter dem Stichwort "Kristalloptik" zu finden.

[0054] In Fig. 4A ist die intrinsische Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimuthwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (100)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 45^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

[0055] In Fig. 4B ist die intrinsische Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimuthwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 45^\circ$ für eine (100)-Linse dargestellt. Die vierzählige Symmetrie ist offensichtlich.

[0056] In Fig. 4C ist die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (100)-Linse dargestellt. Jede Linie repräsentiert Betrag und Richtung für eine durch den Öffnungswinkel θ und den Azimuthwinkel α definierte Strahlrichtung. Die Länge der Linien ist proportional zum Betrag der Doppelbrechung, beziehungsweise der Differenz der Hauptachsenlängen der Schnittellipse, während die Richtung der Linien die Orientierung der längeren Hauptachse der Schnittellipse angibt.

[0057] Die Schnittellipse erhält man, indem man das Indexellipsoid für den Strahl der Richtung (θ, α) mit einer Ebene schneidet, die senkrecht auf der Strahlrichtung steht und durch die Mitte des Indexellipsoide geht. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Vierzähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimuthwinkeln $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ und 270° maximal.

[0058] Fig. 4D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke um 45° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist offensichtlich unabhängig vom Azimuthwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen tangential. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit der Weglänge innerhalb des Materials verknüpft. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$$

55 wobei n die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der maximale Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 30% reduziert werden. Eine rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilung ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils gleiche Öffnungswinkel und gleiche Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene

60 Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0059] In Fig. 5A ist die intrinsische Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimuthwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

65 [0060] In Fig. 5B ist die intrinsische Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimuthwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Die dreizählige Symmetrie ist offensichtlich.

[0061] Fig. 5C zeigt die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (111)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Li-

nien zeigen die Dreizähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimuthwinkeln 0°, 120° und 240° maximal. Im Gegensatz zu einer (100)-Linse dreht sich die Orientierung der Doppelbrechung um 90°, wenn ein Strahl anstatt mit einem Azimuthwinkel von 0° mit einem Azimuthwinkel von 180° durch eine Linse läuft. Somit kann beispielsweise durch zwei gleich orientierte (111)-Linsen die Doppelbrechung kompensiert werden, wenn die Strahlwinkel eines Strahlbüschels zwischen den beiden Linsen ihr Vorzeichen tauschen.

[0062] Fig. 5D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke um 60° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist offensichtlich unabhängig vom Azimuthwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Fig. 4C radial. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit der Weglänge innerhalb des Materials verknüpft. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$$

wobei k die Anzahl der planparallelen (111)-Linsen angibt und 1 eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 68% reduziert werden. Eine rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilung ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils gleiche Winkel und gleiche Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0063] Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachte intrinsische Doppelbrechung weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilung erzielt wird und dann durch Kombination einer Gruppe mit (100)-Linsen und einer Gruppe mit (111)-Linsen sich die beiden Doppelbrechungsverteilungen kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (111)-Linsen steht, wie dies den Fig. 4D und 5D zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilung erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (111)-Linsen.

[0064] In Fig. 6 ist der Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs 611 für die Wellenlänge 157 nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 7 beziehungsweise Tabelle 6. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.9. Die Abbildungsleistung dieses Objektivs ist so gut korrigiert, dass die Abweichung von der Wellenfront einer idealen Kugelwelle kleiner 1.8 $\text{m}\lambda$ bezogen auf die Wellenlänge von 157 nm ist. Gerade bei diesen Hochleistungobjektiven ist es erforderlich, dass störende Einflüsse wie die der intrinsischen Doppelbrechung so weit wie möglich reduziert werden.

[0065] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 6 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege OP_L des äußersten Aperturstrahls 609 für die einzelnen Linsen L601 bis L630 berechnet. Der äußerste Aperturstrahl 609 geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x = 0 \text{ mm}$ und $y = 0 \text{ mm}$ aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Der äußerste Aperturstrahl 609 wird deshalb herangezogen, da sich für ihn nahezu die maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen ergeben.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

DE 101 25 487 A 1

Tabelle 2

| Linse | Öffnungs- winkel θ [°] | Strahlweg OP_L [mm] | Optischer Weg- unterschied | Optischer Weg- unterschied | Optischer Weg- unterschied | Optischer Weg- unterschied |
|-------|----------------------------------|--------------------------|---|--|---|--|
| | | | (111)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ [nm] | (111)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 60^\circ$ [nm] | (100)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ [nm] | (100)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 45^\circ$ [nm] |
| L601 | 8.1 | 15.1 | 2.9 | -2.2 | -0.8 | -0.4 |
| L602 | 8.7 | 8.2 | 1.7 | -1.2 | -0.5 | -0.2 |
| L603 | 7.8 | 9.5 | 1.7 | -1.3 | -0.4 | -0.2 |
| L604 | 10.7 | 7.2 | 1.9 | -1.3 | -0.6 | -0.3 |
| L605 | 9.4 | 6.5 | 1.5 | -1.0 | -0.4 | -0.2 |
| L606 | 10.3 | 8.5 | 2.1 | -1.4 | -0.7 | -0.3 |
| L607 | 21.8 | 12.7 | 6.6 | -2.7 | -3.9 | -1.8 |
| L608 | 25.4 | 22.2 | 12.8 | -4.4 | -8.7 | -3.9 |
| L609 | 16.3 | 36.1 | 14.3 | -7.6 | -6.8 | -3.3 |
| L610 | 12.2 | 15.2 | 4.5 | -2.9 | -1.7 | -0.8 |
| L611 | 2.3 | 26.6 | 1.4 | -1.3 | -0.1 | -0.1 |
| L612 | 2.3 | 32.2 | 1.6 | -1.5 | -0.1 | -0.1 |
| L613 | -18.3 | 30.4 | -6.6 | 13.5 | -7.0 | -3.3 |
| L614 | -18.7 | 22.0 | -4.8 | 10.0 | -5.3 | -2.5 |
| L615 | -14.0 | 10.2 | -2.0 | 3.5 | -1.5 | -0.7 |
| L616 | -1.3 | 29.8 | -0.8 | 0.9 | 0.0 | 0.0 |
| L617 | 26.4 | 31.6 | 18.6 | -6.1 | -13.0 | -5.7 |
| L618 | 33.5 | 14.3 | 9.3 | -2.0 | -7.9 | -3.1 |
| L619 | 26.5 | 7.5 | 4.4 | -1.4 | -3.1 | -1.4 |
| L620 | 19.3 | 6.4 | 3.0 | -1.4 | -1.6 | -0.8 |
| L621 | 6.7 | 8.0 | 1.3 | -1.0 | -0.3 | -0.1 |
| L622 | -10.3 | 7.7 | -1.3 | 1.9 | -0.6 | -0.3 |
| L623 | -11.9 | 9.6 | -1.8 | 2.8 | -1.0 | -0.5 |
| L624 | 0.3 | 17.8 | 0.1 | -0.1 | 0.0 | 0.0 |
| L625 | 6.0 | 16.3 | 2.3 | -1.8 | -0.5 | -0.2 |
| L626 | -24.0 | 9.0 | -1.9 | 5.0 | -3.2 | -1.5 |
| L627 | -35.6 | 8.0 | -0.9 | 5.2 | -4.7 | -1.7 |
| L628 | -39.4 | 12.0 | -1.0 | 7.6 | -7.5 | -2.5 |
| L629 | -35.3 | 27.3 | -3.3 | 17.7 | -15.7 | -5.9 |
| L630 | -35.3 | 26.0 | -3.1 | 16.9 | -15.0 | -5.6 |
| Summe | | | 64,5 | 42,3 | 112,9 | 47,4 |

[0066] Neben den Öffnungswinkeln θ und den Weglängen OP_L für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 2 die optischen Wegunterschiede zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisatoinzuständen für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt. Die optischen Wegunterschiede sind sowohl für (111)-Linsen als auch für (100)-Linsen dargestellt, wobei die Differenzen des Azimuthwinkels α_{AR} des äußersten Randstrahl zum Azimuthwinkel α_L der Linse für eine (111)-Linse 0° und 60° , für eine (100)-Linse 0° und 45° betragen.

[0067] Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass die Öffnungswinkel θ für die Linsen L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 und L630 größer als 25° , für die Linsen L618, L627, L628, L629 und L630 sogar größer als 30° sind. Besonders

60 betroffen von hohen Öffnungswinkeln sind die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L627 bis L630.

[0068] Durch das Design des Projektionsobjektives wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel aller Lichtstrahlen kleiner 45° ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt 39.4° bei der Linse L628. Hilfreich war der Einsatz von zwei dicken Planlinsen L629 und L630 unmittelbar vor der Bildebene.

[0069] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L621 und L622 befindet, beträgt 270 mm. Der Durchmesser der Linse L618 beträgt 207 mm und die Durchmesser der Linsen L627 bis L630 sind alle kleiner 190 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 80% des Blendendurchmessers.

[0070] Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß es für einzelne Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-

Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Dies liegt daran, daß bei (100)-Linsen der Einfluß der <110>-Kristallrichtungen erst bei größeren Winkeln zu spüren ist wie bei (111)-Linsen. Beispielsweise bei den Linsen L608, L609 und L617 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 30% niedriger.

[0071] Anhand der beiden planparallelen Linsen L629 und L630 läßt sich gut zeigen, wie durch gegenseitige Drehung der Linsen die Doppelbrechung deutlich reduziert werden kann.

[0072] Beide Linsen weisen gleiche Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl von 35.3° und ähnliche Strahlwege von 27.3 mm, beziehungsweise 26.0 mm auf. Würden beide Linsen als (100)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein Optischer Wegunterschied von 30.7 nm ergeben. Verdreht man die beiden (100)-Linsen jedoch gegenseitig um 45° , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 20.9 nm, also um 32%. Würden beide Linsen als (111)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein Optischer Wegunterschied von 34.6 nm ergeben. Verdreht man die beiden (111)-Linsen jedoch gegenseitig um 60° , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 13.6 nm, also um 61%.

[0073] Eine nahezu vollständige Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund der intrinsischen Doppelbrechung, die durch die Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, kann erreicht werden, wenn die Linse L629 in die Linsen L6291 und L6292 und die Linse L630 in die Linsen L6301 und L6302 aufgespalten wird, wobei die Linse L6291 eine (100)-Linse der Dicke 9.15 mm, die Linse L6292 eine (111)-Linse der Dicke 13.11 mm, die Linse L6301 eine (100)-Linse der Dicke 8.33 mm und die Linse L6302 eine (111)-Linse der Dicke 12.97 mm ist. Die Linse L6291 und L6301 werden gegeneinander um 45° , die Linsen L6292 und L6302 um 60° gedreht. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall dann 0.2 nm. Die Linsen L6291 und L6292, ebenso wie die Linsen L6301 und L6302 können optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden. Dieses Prinzip ist auch anwendbar, wenn das Projektionsobjektiv nur eine Kristall-Linse enthält. Diese wird dann mindestens in zwei Linsen zerlegt, die zueinander gedreht angeordnet werden. Das Zusammenfügen ist durch Ansprengen möglich. Eine weitere Möglich besteht darin, zunächst einzelne Platten der gewünschten Kristallorientierung optisch nahtlos zu verbinden und in einem weiteren Verfahrensschritt die Linse aus den aneinandergefügten Platten zu fertigen.

[0074] In Fig. 7 ist der Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 711 für die Wellenlänge 157 nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 9 beziehungsweise Tabelle 8. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.8.

[0075] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 7 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege OP_L des oberen äußersten Aperturstrahls 713 und des unteren äußersten Aperturstrahls 715 für die einzelnen Linsen L801 bis L817 berechnet. Die äußersten Aperturstrahlen 713 und 715 gehen dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x = 0$ mm und $y = -82.15$ mm aus und weisen in der Bildebene Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welche der bildseitigen numerischen Apertur entsprechen. Der obere und der untere äußerste Aperturstrahl wurden berechnet, da es sich um ein achsfernes Objektfeld handelt und somit die Aperturstrahlen nicht symmetrisch zur optischen Achse verlaufen, wie dies für den äußersten Aperturstrahl des Ausführungsbeispiels der Fig. 6 der Fall war.

[0076] In Tabelle 4 sind die Daten für den oberen äußersten Aperturstrahl und in Tabelle 5 für den unteren äußersten Aperturstrahl zusammengestellt.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

DE 101 25 487 A 1

Tabelle 4

| Linse | Öffnungs-winkel θ [°] | Strahlweg OP_L [mm] | Optischer Weg-unterschied (111)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ [nm] | Optischer Weg-unterschied (111)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 60^\circ$ [nm] | Optischer Weg-unterschied (100)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ [nm] | Optischer Weg-unterschied (100)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 45^\circ$ [nm] |
|-------|------------------------------|-----------------------|---|--|---|--|
| 801 | 1.4 | 28.1 | 0.8 | -0.8 | 0.0 | 0.0 |
| 802 | -10.8 | 30.7 | -5.3 | 8.0 | -2.7 | -1.3 |
| 803 | -15.6 | 32.4 | -6.8 | 12.4 | -5.7 | -2.7 |
| 803 | -24.4 | 31.8 | -6.5 | 17.8 | -11.7 | -5.2 |
| 802 | -19.5 | 26.6 | -5.8 | 12.4 | -6.8 | -3.2 |
| 804 | 6.4 | 20.1 | 3.0 | -2.4 | -0.6 | -0.3 |
| 805 | 10.8 | 34.4 | 9.0 | -6.0 | -3.0 | -1.5 |
| 806 | 0.2 | 10.0 | 0.1 | -0.1 | 0.0 | 0.0 |
| 807 | -11.1 | 22.0 | -3.9 | 5.9 | -2.1 | -1.0 |
| 808 | 0.1 | 18.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 809 | -0.8 | 9.0 | -0.1 | 0.2 | 0.0 | 0.0 |
| 810 | 1.1 | 12.4 | 0.3 | -0.3 | 0.0 | 0.0 |
| 811 | -16.8 | 9.4 | -2.0 | 3.8 | -1.9 | -0.9 |
| 812 | -10.4 | 29.8 | -5.0 | 7.5 | -2.4 | -1.2 |
| 813 | -8.8 | 34.7 | -5.2 | 7.3 | -2.1 | -1.0 |
| 814 | -9.4 | 17.5 | -2.8 | 4.0 | -1.2 | -0.6 |
| 815 | -27.4 | 28.1 | -5.3 | 16.9 | -12.2 | -5.3 |
| 816 | -28.7 | 40.2 | -7.1 | 24.8 | -18.6 | -7.9 |
| 817 | -30.8 | 39.0 | -6.3 | 24.7 | -19.6 | -8.1 |
| Summe | | | -48.9 | 136.1 | -90.9 | -40.3 |

40

45

50

55

60

65

DE 101 25 487 A 1

Tabelle 5

| Linse | Öffnungs- winkel θ [°] | Strahlweg OP_L [mm] | Optischer Weg- unterschied | Optischer Weg- unterschied | Optischer Weg- unterschied | Optischer Weg- unterschied |
|-------|----------------------------------|--------------------------|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| | | | (111)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ [nm] | (111)-Linse $= 60^\circ$ [nm] | (100)-Linse $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ [nm] | (100)-Linse $= 45^\circ$ [nm] |
| 801 | -11.6 | 32.1 | -5.8 | 9.0 | -3.2 | -1.6 |
| 802 | 19.5 | 28.3 | 13.3 | -6.1 | -7.3 | -3.4 |
| 803 | 24.7 | 33.8 | 19.1 | -6.9 | -12.7 | -5.7 |
| 803 | 17.7 | 34.3 | 14.7 | -7.4 | -7.5 | -3.6 |
| 802 | 12.7 | 31.6 | 9.7 | -6.0 | -3.8 | -1.8 |
| 804 | -5.2 | 27.7 | -2.7 | 3.3 | -0.6 | -0.3 |
| 805 | -4.5 | 34.6 | -3.0 | 3.5 | -0.5 | -0.3 |
| 806 | -8.6 | 19.5 | -2.9 | 4.0 | -1.1 | -0.6 |
| 807 | -0.5 | 16.5 | -0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.0 |
| 808 | -8.2 | 25.6 | -3.7 | 5.0 | -1.3 | -0.7 |
| 809 | -7.5 | 10.1 | -1.3 | 1.8 | -0.4 | -0.2 |
| 810 | -9.1 | 13.1 | -2.0 | 2.9 | -0.8 | -0.4 |
| 811 | 9.0 | 9.9 | 2.1 | -1.5 | -0.6 | -0.3 |
| 812 | 2.6 | 30.7 | 1.8 | -1.6 | -0.2 | -0.1 |
| 813 | 0.9 | 34.0 | 0.6 | -0.6 | 0.0 | 0.0 |
| 814 | 1.3 | 10.4 | 0.3 | -0.3 | 0.0 | 0.0 |
| 815 | 23.5 | 16.3 | 8.9 | -3.4 | -5.7 | -2.6 |
| 816 | 24.6 | 37.2 | 21.0 | -7.6 | -13.9 | -6.2 |
| 817 | 29.4 | 29.6 | 18.5 | -5.1 | -14.1 | -5.9 |
| Summe | | | 88.3 | -16.8 | -73.7 | -33.5 |

[0077] Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass die Öffnungswinkel θ für die Linsen L815 bis L817 größer als 25° sind. Auch in diesem Ausführungsbeispiel weisen die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L815 bis L817 große Öffnungswinkel auf. Durch das Design der Linsen L815 bis L817 wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel kleiner gleich

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ$$

ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt 30.8° für die Linse L817.

[0078] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L811 und L812 befindet, beträgt 193 mm. Die Durchmesser der Linsen L815 bis L817 sind alle kleiner als 162 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 85% des Blendendurchmessers.

[0079] Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß es für Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Beispielsweise bei den Linsen L815 bis L817 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 20% niedriger.

[0080] Anhand des Ausführungsbeispiels der Fig. 7 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch den parallelen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen die intrinsische Doppelbrechung weitgehend kompensiert werden kann.

[0081] Zunächst werden alle Kalzium-Fluorid in (111)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (111)-Linsen eingebaut. In diesem Fall ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 136 nm. Durch Drehen der (111)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 38 nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 60° betragen. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von 30°.

[0082] Werden alle Kalzium-Fluorid in (100)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (100)-Linsen eingebaut, so ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 90.6 nm. Durch Drehen der (100)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 40 nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe

DE 101 25 487 A 1

zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 45° betragen. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von 22.5° .

5 [0083] Eine maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 7 nm erhält man, wenn man nun Gruppen mit (100)-Linsen mit Gruppen mit (111)-Linsen kombiniert. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe von (111)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen 60° beträgt. Die Linsen L802 und L803 werden zu einer Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen 45° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (100)-Linsen werden die Linsen L808, L809 und L810 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (111)-Linsen werden die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von 22.5° . Die Linsenachsen der nicht zu einer Gruppe zusammengefaßten Linsen L805 und L807 sind in <111>-Kristallrichtung orientiert, während die Linsenachse der Linsen L806 in <100>-Kristallrichtung orientiert ist.

10 [0084] Um Doppelbrechung von Kristallen im UV zu kompensieren, kann man, wie oben beschrieben, Kristall-Elemente mit verschiedenen Orientierungen der Kristallachsen hintereinander anordnen. Wenn man in einem optischen System Linsen mit verschiedenen Kristallrichtungen hintereinander anordnet, hat man das Problem, dass vielfach Linsen mit verschiedenen Winkeln durchstrahlt werden, die Kompensation dann möglicherweise nur eingeschränkt möglich ist.

15 [0085] Bei Optiken, die nur eine Kristalllinse enthalten, ist diese Art der Kompensation überhaupt nicht möglich.

20 [0086] Ein Lösungsmöglichkeit ist es, eine Linse konstruktiv in zwei aufzuspalten, die verdreht gegeneinander angesprengt sind. Praktisch leidet dieses Verfahren an Spannungen, die die Passe verformen und daran, dass die beiden Hälften lateral mit einer Genauigkeit von Mikrometern positioniert werden müssen.

25 [0087] Vorgeschlagen wird, Blanks aus aneinander angesprengten, hinsichtlich der Orientierung der Kristallachsen gegeneinander verdrehten Einzelplatten herzustellen, die dann zu einer Linse gefräst und poliert werden. Alles obengesagte über die Orientierung gilt auch hierfür. Außer dem klassischen Ansprenge (wringing) der Optik-Fertigung sind auch alle anderen Fügetechniken mit innigem Kontakt und geringstmöglichen Spannungsbeitrag möglich und von der Erfahrung umfaßt. Das Ansprenge kann insbesondere durch Schichten, z. B. aus Quarzglas, unterstützt werden. Wichtig ist, daß an der Fügestelle keine Brechung oder Reflexion auftritt, die störend wäre.

30 [0088] Anhand von Fig. 8 wird der prinzipielle Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage beschrieben. Die Projektionsbelichtungsanlage 81 weist eine Beleuchtungseinrichtung 83 und Projektionsobjektiv 85 auf. Das Projektionsobjektiv 85 umfaßt eine Linsenanordnung 819 mit einer Aperturblende AP, wobei durch die Linsenanordnung 89 eine optische Achse 87 definiert wird. Ausführungsbeispiele für die Linsenanordnung 89 sind in Fig. 6 und Fig. 7 gegeben. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung 83 und dem Projektionsobjektiv 85 ist eine Maske 89 angeordnet, die mittels eines Maskenhalters 811 im Strahlengang gehalten wird. Solche in der Mikrolithographie verwendeten Masken 89 weisen eine Mikrometer-Nanometer Struktur auf, die mittels des Projektionsobjektives 85 beispielsweise um den Faktor 4 oder 5 verkleinert auf eine Bildebene 813 abgebildet wird. In der Bildebene 813 wird ein durch einen Substrathalter 817 positioniertes lichtempfindliches Substrat 815, beziehungsweise ein Wafer, gehalten.

35 [0089] Die noch auflösbaren minimalen Strukturen hängen von der Wellenlänge λ des für die Beleuchtung verwendeten Lichtes sowie von der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektives 85 ab, wobei die maximal erreichbare Auflösung der Projektionsbelichtungsanlage 81 mit abnehmender Wellenlänge λ der Beleuchtungseinrichtung 83 und mit zunehmender bildseitiger numerischer Apertur des Projektionsobjektives 85 steigt. Mit den in Fig. 6 und Fig. 7 gezeigten Ausführungsbeispielen lassen sich Auflösungen kleiner 150 nm realisieren. Deshalb müssen auch Effekte wie die intrinsische Doppelbrechung minimiert werden. Durch die Erfahrung ist es gelungen, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung gerade bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen stark zu reduzieren.

50

55

60

65

DE 101 25 487 A 1

TABELLE 1

M1587a

| LINSEN | RADIEN | DICKEN | GLÄSER | BRECHZAHL BEI 157.629nm | 1/2 FREIER DURCHMESSER | S |
|--------|-------------------|--------------|--------|----------------------------|---------------------------|----|
| 0 | 0.000000000 | 27.171475840 | N2 | 1.00031429 | 46.200 | |
| | 0.000000000 | 0.602670797 | N2 | 1.00031429 | 52.673 | |
| L601 | 900.198243311AS | 15.151284556 | CaF2 | 1.55929035 | 53.454 | |
| | -235.121108435 | 9.531971079 | N2 | 1.00031429 | 54.049 | 10 |
| L602 | -167.185917779 | 8.294716452 | CaF2 | 1.55929035 | 54.178 | |
| | -132.673519510 | 14.020355779 | N2 | 1.00031429 | 54.901 | |
| L603 | -333.194588652 | 9.893809820 | CaF2 | 1.55929035 | 53.988 | |
| | -155.450516203 | 15.930502944 | N2 | 1.00031429 | 54.132 | |
| L604 | -73.572316296 | 7.641977580 | CaF2 | 1.55929035 | 53.748 | |
| | -68.248613899AS | 2.881720302 | N2 | 1.00031429 | 55.167 | 15 |
| L605 | -86.993585564AS | 5.094651720 | CaF2 | 1.55929035 | 52.580 | |
| | -238.150965327 | 5.379130780 | N2 | 1.00031429 | 53.729 | |
| L606 | -165.613920870 | 5.094651720 | CaF2 | 1.55929035 | 53.730 | |
| | 153.417884485 | 34.150169591 | N2 | 1.00031429 | 56.762 | |
| L607 | -92.061009990 | 5.094651720 | CaF2 | 1.55929035 | 58.081 | 20 |
| | 8491.086261873AS | 19.673523795 | N2 | 1.00031429 | 74.689 | |
| L608 | -407.131300451 | 30.380807138 | CaF2 | 1.55929035 | 87.291 | |
| | -140.620317156 | 0.761662684 | N2 | 1.00031429 | 91.858 | |
| L609 | -4831.804853654AS | 50.269660218 | CaF2 | 1.55929035 | 117.436 | |
| | -192.197373609 | 1.688916911 | N2 | 1.00031429 | 121.408 | |
| L610 | -367.718684892 | 21.227715500 | CaF2 | 1.55929035 | 127.704 | 25 |
| | -233.628547894 | 2.224071019 | N2 | 1.00031429 | 129.305 | |
| L611 | 709.585855080 | 28.736922725 | CaF2 | 1.55929035 | 137.016 | |
| | 1238.859445357 | 9.120684720 | N2 | 1.00031429 | 137.428 | |
| L612 | 1205.457051945 | 49.281218258 | CaF2 | 1.55929035 | 138.288 | |
| | -285.321880705 | 1.625271224 | N2 | 1.00031429 | 138.379 | |
| L613 | 137.549591710 | 56.718543740 | CaF2 | 1.55929035 | 108.652 | 30 |
| | -4380.301012978AS | 0.623523902 | N2 | 1.00031429 | 106.138 | |
| L614 | 2663.880214408 | 6.792868960 | CaF2 | 1.55929035 | 103.602 | |
| | 149.184979730 | 15.779049257 | N2 | 1.00031429 | 84.589 | |
| L615 | 281.093108064 | 6.792868960 | CaF2 | 1.55929035 | 83.373 | |
| | 184.030288413 | 32.341552355 | N2 | 1.00031429 | 77.968 | 35 |
| L616 | -222.157416308 | 5.094651720 | CaF2 | 1.55929035 | 77.463 | |
| | 101.254238115AS | 56.792834221 | N2 | 1.00031429 | 71.826 | |
| L617 | -106.980638018 | 5.094651720 | CaF2 | 1.55929035 | 72.237 | |
| | 1612.305471130 | 20.581065398 | N2 | 1.00031429 | 89.760 | |
| L618 | -415.596135628 | 26.398111993 | CaF2 | 1.55929035 | 96.803 | |
| | -204.680044631 | 0.713343960 | N2 | 1.00031429 | 103.409 | 40 |
| L619 | -646.696622394 | 25.867340760 | CaF2 | 1.55929035 | 116.636 | |
| | -231.917626896 | 0.766268682 | N2 | 1.00031429 | 118.569 | |
| L620 | -790.657607677 | 23.400482872 | CaF2 | 1.55929035 | 128.806 | |
| | -294.872053725 | 0.721402031 | N2 | 1.00031429 | 130.074 | |
| L621 | 786.625567756 | 40.932308205 | CaF2 | 1.55929035 | 141.705 | 45 |
| | -431.247283013 | 12.736629300 | N2 | 1.00031429 | 142.089 | |
| | 0.000000000 | -8.491086200 | N2 | 1.00031429 | 134.586 | |
| L622 | 295.022653593AS | 20.185109438 | CaF2 | 1.55929035 | 139.341 | |
| | 449.912291916 | 0.619840486 | N2 | 1.00031429 | 137.916 | |
| L623 | 358.934076212 | 48.662890509 | CaF2 | 1.55929035 | 136.936 | |
| | -622.562988878 | 30.955714157 | N2 | 1.00031429 | 135.288 | 50 |
| L624 | -224.404889753 | 12.736629300 | CaF2 | 1.55929035 | 134.760 | |
| | -251.154571510AS | 16.079850229 | N2 | 1.00031429 | 134.853 | |
| L625 | -193.582989843AS | 16.510083506 | CaF2 | 1.55929035 | 134.101 | |
| | -198.077570749 | 0.880353872 | N2 | 1.00031429 | 136.109 | |
| L626 | 206.241795157 | 19.927993542 | CaF2 | 1.55929035 | 101.240 | |
| | 338.140581666 | 0.925956949 | N2 | 1.00031429 | 97.594 | 55 |
| L627 | 111.017549581 | 24.580089962 | CaF2 | 1.55929035 | 85.023 | |
| | 169.576109839 | 0.777849447 | N2 | 1.00031429 | 81.164 | |
| L628 | 117.982165264 | 31.161065630 | CaF2 | 1.55929035 | 75.464 | |
| | 921.219058213AS | 6.934980174 | N2 | 1.00031429 | 69.501 | |
| L629 | 0.000000000 | 22.260797322 | CaF2 | 1.55929035 | 63.637 | 60 |
| | 0.000000000 | 4.245543100 | N2 | 1.00031429 | 48.606 | |
| L630 | 0.000000000 | 21.227715500 | CaF2 | 1.55929035 | 41.032 | |
| | 0.000000000 | 8.491086200 | N2 | 1.00031429 | 26.698 | |
| | 0.000000000 | 0.000000000 | | 1.000000000 | 11.550 | |

Wellenlänge und Brechzahl sind gegenüber Vakuum angegeben.

65

DE 101 25 487 A 1

ASPHÆRISCHE KONSTANTEN

5 Asphäre der Linse L601

| | | |
|----|----|------------------|
| 5 | K | 0.0000 |
| | C1 | 1.28594437e-007 |
| | C2 | 8.50731836e-013 |
| 10 | C3 | 1.16375620e-016 |
| | C4 | 2.28674275e-019 |
| | C5 | -1.23202729e-022 |
| | C6 | 3.32056239e-026 |
| | C7 | -4.28323389e-030 |
| 15 | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

Asphäre der Linse L604

| | | |
|----|----|------------------|
| 20 | K | -1.3312 |
| | C1 | -4.03355456e-007 |
| | C2 | 2.25776586e-011 |
| | C3 | -2.19259878e-014 |
| | C4 | 4.32573397e-018 |
| 25 | C5 | -7.92477159e-022 |
| | C6 | 7.57618874e-026 |
| | C7 | -7.14962797e-030 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

30

Asphäre der Linse L605

| | | |
|----|----|------------------|
| 35 | K | -1.1417 |
| | C1 | 1.33637337e-007 |
| | C2 | 1.56787758e-011 |
| | C3 | -1.64362484e-014 |
| | C4 | 3.59793786e-018 |
| | C5 | -5.11312568e-022 |
| 40 | C6 | 1.70636633e-026 |
| | C7 | 1.82384731e-030 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

45 Asphäre der Linse L607

| | | |
|----|----|------------------|
| | K | 0.0000 |
| | C1 | 1.34745120e-007 |
| 50 | C2 | -2.19807543e-011 |
| | C3 | 1.20275881e-015 |
| | C4 | 4.39597377e-020 |
| | C5 | -2.37132819e-023 |
| | C6 | 2.87510939e-027 |
| 55 | C7 | -1.42065162e-031 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

60

65

DE 101 25 487 A 1

Asphäre der Linse L609

| | | |
|----|------------------|----|
| K | 0.0000 | |
| C1 | 6.85760526e-009 | 5 |
| C2 | -4.84524868e-013 | |
| C3 | -6.28751350e-018 | |
| C4 | -3.72607209e-022 | |
| C5 | 3.25276841e-026 | |
| C6 | -4.05509974e-033 | |
| C7 | -3.98843079e-035 | 10 |
| C8 | 0.00000000e+000 | |
| C9 | 0.00000000e+000 | |

Asphäre der Linse L613

| | | |
|----|------------------|----|
| K | 0.0000 | |
| C1 | 2.24737416e-008 | |
| C2 | -4.45043770e-013 | |
| C3 | -4.10272049e-017 | 20 |
| C4 | 4.31632628e-021 | |
| C5 | -3.27538237e-025 | |
| C6 | 1.44053025e-029 | |
| C7 | -2.76858490e-034 | |
| C8 | 0.00000000e+000 | 25 |
| C9 | 0.00000000e+000 | |

Asphäre der Linse L616

| | | |
|----|------------------|----|
| K | 0.0000 | |
| C1 | -2.83553693e-008 | |
| C2 | -1.12122261e-011 | |
| C3 | -2.05192812e-016 | |
| C4 | -1.55525080e-020 | |
| C5 | -4.77093112e-024 | 35 |
| C6 | 8.39331135e-028 | |
| C7 | -8.97313681e-032 | |
| C8 | 0.00000000e+000 | |
| C9 | 0.00000000e+000 | 40 |

Asphäre der Linse L622

| | | |
|----|------------------|----|
| K | 0.0421 | |
| C1 | 7.07310826e-010 | 45 |
| C2 | -2.00157185e-014 | |
| C3 | -9.33825109e-020 | |
| C4 | 1.27125854e-024 | |
| C5 | 1.94008709e-027 | |
| C6 | -6.11989858e-032 | 50 |
| C7 | 2.92367322e-036 | |
| C8 | 0.00000000e+000 | |
| C9 | 0.00000000e+000 | 55 |

60

65

DE 101 25 487 A 1

Asphäre der Linse L624

5 K 0.0000
 C1 3.02835805e-010
 C2 -2.40484062e-014
 C3 -3.22339189e-019
 C4 1.64516979e-022
 C5 -8.51268614e-027
10 C6 2.09276792e-031
 C7 -4.74605669e-036
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

15 Asphäre der Linse L625

20 K 0.0000
 C1 -3.99248993e-010
 C2 5.79276562e-014
 C3 3.53241478e-018
 C4 -4.57872308e-023
 C5 -6.29695208e-027
 C6 1.57844931e-031
 C7 -2.19266130e-036
25 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L628

30 K 0.0000
 C1 4.40737732e-008
 C2 1.52385268e-012
 C3 -5.44510329e-016
35 C4 6.32549789e-020
 C5 -4.58358203e-024
 C6 1.92230388e-028
 C7 -3.11311258e-033
 C8 0.00000000e+000
40 C9 0.00000000e+000

45

50

55

60

65

DE 101 25 487 A 1

TABELLE 3

L61

| LINSEN | RADIEN | DICKEN | GLÄSER | BRECHZAHL BEI 157.13 nm | 1/2 FREIER DURCHMESSER | |
|--------|------------------|---------------|--------|----------------------------|---------------------------|----|
| 0 | 0.000000000 | 34.000000000 | | 1.00000000 | 82.150 | |
| | 0.000000000 | 0.100000000 | | 1.00000000 | 87.654 | |
| L801 | 276.724757380 | 40.000000000 | CaF2 | 1.55970990 | 90.112 | |
| | 1413.944109416AS | 95.000000000 | | 1.00000000 | 89.442 | |
| SP1 | 0.000000000 | 11.000000000 | | 1.00000000 | 90.034 | |
| | 0.000000000 | 433.237005445 | | 1.00000000 | 90.104 | 10 |
| L802 | -195.924336384 | 17.295305525 | CaF2 | 1.55970990 | 92.746 | |
| | -467.658808527 | 40.841112468 | | 1.00000000 | 98.732 | |
| L803 | -241.385736441 | 15.977235467 | CaF2 | 1.55970990 | 105.512 | |
| | -857.211727400AS | 21.649331094 | | 1.00000000 | 118.786 | |
| SP2 | 0.000000000 | 0.000010000 | | 1.00000000 | 139.325 | |
| | 253.074839896 | 21.649331094 | | 1.00000000 | 119.350 | |
| L803 | 857.211727400AS | 15.977235467 | CaF2 | 1.55970990 | 118.986 | |
| | 241.385736441 | 40.841112468 | | 1.00000000 | 108.546 | |
| L802 | 467.658808527 | 17.295305525 | CaF2 | 1.55970990 | 102.615 | |
| | 195.924336384 | 419.981357165 | | 1.00000000 | 95.689 | 20 |
| SP3 | 0.000000000 | 6.255658280 | | 1.00000000 | 76.370 | |
| | 0.000000000 | 42.609155219 | | 1.00000000 | 76.064 | |
| Z1 | 0.000000000 | 67.449547115 | | 1.00000000 | 73.981 | |
| L804 | 432.544479547 | 37.784311058 | CaF2 | 1.55970990 | 90.274 | |
| | -522.188532471 | 113.756133662 | | 1.00000000 | 92.507 | |
| L805 | -263.167605725 | 33.768525968 | CaF2 | 1.55970990 | 100.053 | |
| | -291.940616829AS | 14.536591424 | | 1.00000000 | 106.516 | |
| L806 | 589.642961222AS | 20.449887046 | CaF2 | 1.55970990 | 110.482 | |
| | -5539.698828792 | 443.944079795 | | 1.00000000 | 110.523 | |
| L807 | 221.780582003 | 9.000000000 | CaF2 | 1.55970990 | 108.311 | |
| | 153.071443064 | 22.790060084 | | 1.00000000 | 104.062 | |
| L808 | 309.446967518 | 38.542735318 | CaF2 | 1.55970990 | 104.062 | 30 |
| | -2660.227900099 | 0.100022286 | | 1.00000000 | 104.098 | |
| L809 | 23655.354584194 | 12.899131182 | CaF2 | 1.55970990 | 104.054 | |
| | -1473.189213176 | 9.318886362 | | 1.00000000 | 103.931 | |
| L810 | -652.136459374 | 16.359499814 | CaF2 | 1.55970990 | 103.644 | |
| | -446.489459129 | 0.100000000 | | 1.00000000 | 103.877 | 35 |
| L811 | 174.593507050 | 25.900313780 | CaF2 | 1.55970990 | 99.267 | |
| | 392.239615259AS | 14.064505431 | | 1.00000000 | 96.610 | |
| | 0.000000000 | 2.045119392 | | 1.00000000 | 96.552 | |
| L812 | 7497.306838492 | 16.759051656 | CaF2 | 1.55970990 | 96.383 | |
| | 318.210831711 | 8.891640764 | | 1.00000000 | 94.998 | |
| L813 | 428.724465129 | 41.295806263 | CaF2 | 1.55970990 | 95.548 | |
| | 3290.097860119AS | 7.377912006 | | 1.00000000 | 95.040 | |
| L814 | 721.012739719 | 33.927118706 | CaF2 | 1.55970990 | 95.443 | |
| | -272.650872353 | 6.871397517 | | 1.00000000 | 95.207 | |
| L815 | 131.257556743 | 38.826450065 | CaF2 | 1.55970990 | 81.345 | |
| | 632.112566477AS | 4.409527396 | | 1.00000000 | 74.847 | |
| L816 | 342.127616157AS | 37.346293509 | CaF2 | 1.55970990 | 70.394 | |
| | 449.261078744 | 4.859754445 | | 1.00000000 | 54.895 | |
| L817 | 144.034814702 | 34.792179308 | CaF2 | 1.55970990 | 48.040 | |
| | -751.263321098AS | 11.999872684 | | 1.00000000 | 33.475 | |
| 0' | 0.000000000 | 0.000127776 | | 1.00000000 | 16.430 | |

50

55

60

65

ASPHÆRISCHE KONSTANTEN

5 Asphäre der Linse L801

| | | |
|----|----|------------------|
| 5 | K | 0.0000 |
| | C1 | 4.90231706e-009 |
| | C2 | 3.08634889e-014 |
| | C3 | -9.53005325e-019 |
| 10 | C4 | -6.06316417e-024 |
| | C5 | 6.11462814e-028 |
| | C6 | -8.64346302e-032 |
| | C7 | 0.00000000e+000 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| 15 | C9 | 0.00000000e+000 |

Asphäre der Linse L803

| | | |
|----|----|------------------|
| 20 | K | 0.0000 |
| | C1 | -5.33460884e-009 |
| | C2 | 9.73867225e-014 |
| | C3 | -3.28422058e-018 |
| | C4 | 1.50550421e-022 |
| 25 | C5 | 0.00000000e+000 |
| | C6 | 0.00000000e+000 |
| | C7 | 0.00000000e+000 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

| | | |
|----|------------------------|--|
| 30 | Asphäre der Linse L803 | |
|----|------------------------|--|

| | | |
|----|----|------------------|
| 35 | K | 0.0000 |
| | C1 | 5.33460884e-009 |
| | C2 | -9.73867225e-014 |
| | C3 | 3.28422058e-018 |
| | C4 | -1.50550421e-022 |
| | C5 | 0.00000000e+000 |
| 40 | C6 | 0.00000000e+000 |
| | C7 | 0.00000000e+000 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

| | | |
|----|------------------------|--|
| 45 | Asphäre der Linse L805 | |
|----|------------------------|--|

| | | |
|----|----|------------------|
| 50 | K | 0.0000 |
| | C1 | 2.42569449e-009 |
| | C2 | 3.96137865e-014 |
| | C3 | -2.47855149e-018 |
| | C4 | 7.95092779e-023 |
| | C5 | 0.00000000e+000 |
| | C6 | 0.00000000e+000 |
| 55 | C7 | 0.00000000e+000 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

60

65

DE 101 25 487 A 1

Asphäre der Linse L806

| | | |
|----|------------------|----|
| K | 0.0000 | |
| C1 | -6.74111232e-009 | 5 |
| C2 | -2.57289693e-014 | |
| C3 | -2.81309020e-018 | |
| C4 | 6.70057831e-023 | |
| C5 | 5.06272344e-028 | |
| C6 | -4.81282974e-032 | |
| C7 | 0.00000000e+000 | 10 |
| C8 | 0.00000000e+000 | |
| C9 | 0.00000000e+000 | |

Asphäre der Linse L811

| | | |
|----|------------------|----|
| K | 0.0000 | |
| C1 | 2.28889624e-008 | |
| C2 | -1.88390559e-014 | 20 |
| C3 | 2.86010656e-017 | |
| C4 | -3.18575336e-021 | |
| C5 | 1.45886017e-025 | |
| C6 | -1.08492931e-029 | |
| C7 | 0.00000000e+000 | |
| C8 | 0.00000000e+000 | 25 |
| C9 | 0.00000000e+000 | |

Asphäre der Linse L813

| | | |
|----|------------------|-----|
| K | 0.0000 | |
| C1 | 3.40212872e-008 | 30. |
| C2 | -1.08008877e-012 | |
| C3 | 4.33814531e-017 | |
| C4 | -7.40125614e-021 | |
| C5 | 5.66856812e-025 | 35 |
| C6 | 0.00000000e+000 | |
| C7 | 0.00000000e+000 | |
| C8 | 0.00000000e+000 | |
| C9 | 0.00000000e+000 | 40 |

Asphäre der Linse L815

| | | |
|----|------------------|----|
| K | 0.0000 | |
| C1 | -3.15395039e-008 | 45 |
| C2 | 4.30010133e-012 | |
| C3 | 3.11663337e-016 | |
| C4 | -3.64089769e-020 | |
| C5 | 1.06073268e-024 | |
| C6 | 0.00000000e+000 | 50 |
| C7 | 0.00000000e+000 | |
| C8 | 0.00000000e+000 | |
| C9 | 0.00000000e+000 | 55 |

60

65

Asphäre der Linse L816

| | | |
|----|----|------------------|
| 5 | K | 0.0000 |
| | C1 | -2.16574623e-008 |
| | C2 | -6.67182801e-013 |
| | C3 | 4.46519932e-016 |
| | C4 | -3.71571535e-020 |
| | C5 | 0.00000000e+000 |
| 10 | C6 | 0.00000000e+000 |
| | C7 | 0.00000000e+000 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

15 Asphäre der Linse L817

| | | |
|----|----|------------------|
| 20 | K | 0.0000 |
| | C1 | 2.15121397e-008 |
| | C2 | -1.65301726e-011 |
| | C3 | -5.03883747e-015 |
| | C4 | 1.03441815e-017 |
| | C5 | -6.29122773e-021 |
| | C6 | 1.44097714e-024 |
| 25 | C7 | 0.00000000e+000 |
| | C8 | 0.00000000e+000 |
| | C9 | 0.00000000e+000 |

Patentansprüche

30 1. Projektionsobjektiv (611, 711) für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81) mit einer Mehrzahl von Linsen (L601-L630, L801-L817), wobei mindestens eine Linse (1) aus einem Fluorid-Kristall besteht, **durch gekennzeichnet**, daß die mindestens eine Linse (1) eine (100)-Linse mit einer Linsenachse (EA) ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht.

35 2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, wobei die (100)-Linse eine rotationssymmetrische Linse mit einer Symmetriearchse ist und die Symmetriearchse mit der Linsenachse der (100)-Linse zusammenfällt.

3. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 2 mit einer optischen Achse (OA), wobei die Linsenachse der (100)-Linse mit der optischen Achse des Projektionsobjektivs zusammenfällt.

40 4. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei innerhalb des Projektionsobjektivs Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und mindestens ein Lichtstrahl (609, 713, 715) innerhalb der (100)-Linse einen Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweist, der größer als 25°, insbesondere größer als 30° ist.

45 5. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei innerhalb des Projektionsobjektivs Lichtstrahlen von einer Objektebene zu einer Bildebene verlaufen und alle Lichtstrahlen innerhalb der (100)-Linse Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweisen, die maximal 45°, insbesondere maximal

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

50 6. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit einer Blendenebene, wobei die Blendenebene einen Blendendurchmesser aufweist und wobei die (100)-Linse einen Linsendurchmesser aufweist und wobei der Linsendurchmesser kleiner als 85%, insbesondere kleiner als 80% des Blendendurchmessers ist.

55 7. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 6 mit einer Bildebene, wobei die (100)-Linse (L630, L817) die der Bildebene nächste Linse ist.

8. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei von einem Objektpunkt innerhalb einer Objektebene ein Strahlbüschel mit Strahlen ausgeht, welche jeweils einen Azimuthwinkel α und einen Öffnungswinkel θ aufweisen, wobei das Strahlbüschel in einer Bildebene eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ aufweist und die (100)-Linsen derart um die optische Achse zueinander verdreht angeordnet sind, daß die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (100)-Linsen aufweist.

60 9. Projektionsobjektiv nach Anspruch 8, wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 Doppelbrechungswerte $\Delta n(\theta_0, \alpha)$ in Abhängigkeit vom Azimuthwinkel α aufweist, die weniger als 20% variieren.

65 10. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 9, wobei die (100)-Linsen Bezugsrichtungen aufweisen, welche senkrecht zu den Linsenachsen stehen und in eine Hauptkristallrichtung zeigen, wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen (100)-Linsen Drehwinkel β definiert sind, wobei für den Drehwinkel β zwischen je

DE 101 25 487 A 1

zwei (100)-Linsen einer Gruppe von n (100)-Linsen gilt:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$$

wobei n die Anzahl der (100)-Linsen der Gruppe angibt und m eine ganze Zahl ist.

11. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der (100)-Linsen jeweils einen Azimuthwinkel α_L und jeweils einen Öffnungswinkel θ_L aufweist und wobei die Öffnungswinkel θ_L innerhalb der (100)-Linsen der Gruppe maximal um 30%, insbesondere um 20% variieren.

12. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 11, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der (100)-Linsen jeweils einen Strahlweg OP_L zurücklegt und wobei die Strahlwege OP_L innerhalb der (100)-Linsen der Gruppe maximal um 30%, insbesondere um 20% variieren.

13. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der (100)-Linsen einen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erfährt und wobei die bei Drehwinkel $\beta = 0^\circ$ bestimmten optischen Wegunterschiede innerhalb der (100)-Linsen der Gruppe maximal um 30%, insbesondere um 20% variieren.

14. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 9 bis 13, wobei die Gruppe zwei (100)-Linsen umfaßt.

15. Projektionsobjektiv nach Anspruch 14, wobei die zwei (100)-Linsen (L629, L630) benachbart angeordnet sind, insbesondere aneinander angesprengt sind.

16. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 9 bis 15, wobei das Projektionsobjektiv mindestens zwei Gruppen mit jeweils gegeneinander verdrehten (100)-Linsen aufweist.

17. Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer Mehrzahl von Linsen, wobei mindestens zwei Linsen aus einem Fluorid-Kristall bestehen, wobei die mindestens zwei Linsen (111)-Linsen sind, bei denen die Linsenachsen annähernd senkrecht auf den {111}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls stehen, und die (111)-Linsen zentriert um die optische Achse angeordnet sind, wobei von einem Objektpunkt innerhalb einer Objektebene ein Strahlbüschel mit Strahlen ausgeht, welche jeweils einen Azimuthwinkel α und einen Öffnungswinkel θ in der Objektebene aufweisen, wobei das Strahlbüschel in einer Bildebene eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ aufweist und die (111)-Linsen derart um die optische Achse zueinander verdreht angeordnet sind, daß die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (111)-Linsen aufweist.

18. Projektionsobjektiv nach Anspruch 17, wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta_0, \alpha)$ für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 Doppelbrechungswerte $\Delta n(\theta_0, \alpha)$ in Abhängigkeit vom Azimuthwinkel α aufweist, die weniger als 20% variieren.

19. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 17 bis 18, wobei die (111)-Linsen Bezugsrichtungen aufweisen, welche senkrecht zu den Linsenachsen stehen und in eine Hauptkristallrichtung zeigen, wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen (111)-Linsen Drehwinkel γ definiert sind, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei (111)-Linsen einer Gruppe von k (111)-Linsen gilt:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 8^\circ$$

wobei k die Anzahl der (111)-Linsen der Gruppe angibt und 1 eine ganze Zahl ist.

20. Projektionsobjektiv nach Anspruch 19, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der (111)-Linsen jeweils einen Azimuthwinkel α_L und jeweils einen Öffnungswinkel θ_L aufweist und wobei die Azimuthwinkel α_L und die Öffnungswinkel θ_L innerhalb der (111)-Linsen der Gruppe maximal um 30%, insbesondere um 20% variieren.

21. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 19 bis 20, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der (100)-Linsen jeweils einen Strahlweg OP_L zurücklegt und wobei die Strahlwege OP_L innerhalb der (111)-Linsen der Gruppe maximal um 30%, insbesondere um 20% variieren.

22. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 19 bis 21, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der (111)-Linsen einen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erfährt und wobei die bei Drehwinkel $\beta = 0^\circ$ bestimmten optischen Wegunterschiede innerhalb der (111)-Linsen der Gruppe maximal um 30%, insbesondere um 20% variieren.

23. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 19 bis 22, wobei die zweite Gruppe zwei (111)-Linsen umfaßt.

24. Projektionsobjektiv nach Anspruch 23, wobei die zwei (111)-Linsen (L629, L630) benachbart angeordnet sind, insbesondere aneinander angesprengt sind.

25. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 19 bis 24, wobei das Projektionsobjektiv mindestens zwei Gruppen mit jeweils gegeneinander verdrehten (111)-Linsen aufweist.

26. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 16 und nach einem der Ansprüche 17 bis 25, wobei von einem Objektpunkt innerhalb einer Objektebene ein Strahlbüschel mit Strahlen ausgeht, welche jeweils einen Azimuthwinkel α und einen Öffnungswinkel θ in der Objektebene aufweisen, wobei das Strahlbüschel in einer Bildebene eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ aufweist und die (100)-Linsen und die (111)-Linsen derart um die optische Achse zueinander verdreht angeordnet sind, daß die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (100)-Linsen und (111)-Linsen aufweist.

27. Projektionsobjektiv nach Anspruch 26, wobei sich die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ aus einer (100)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$, welche durch die (100)-Linsen hervorgerufen wird, und einer (111)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$, welche durch die (111)-Linsen hervorgerufen wird, zusammensetzt und der

Maximalwert der Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ maximal 20% des Maximalwertes der (100)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$ oder des Maximalwertes der (111)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$ beträgt.

28. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 27, wobei der Fluorid Kristall ein Kalzium-Fluorid-Kristall, ein Strontium-Fluorid-Kristall oder ein Barium-Fluorid-Kristall ist.

5 29. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 28, wobei das Projektionsobjektiv eine bildseitige numerische Apertur NA aufweist und die bildseitige numerische Apertur NA größer als 0.7, insbesondere größer als 0.8 ist.

30. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 29, wobei die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200 nm aufweisen.

10 31. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 30, wobei die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 160 nm aufweisen.

32. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 31, wobei das Projektionsobjektiv (611) ein refraktives Objektiv ist.

15 33. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 32, wobei das Projektionsobjektiv ein katadioptrisches Objektiv (711) mit Linsen und mindestens einem Konkavspiegel (Sp2) ist.

34. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 33, wobei alle Linsen aus Kalzium-Fluorid sind.

15 35. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), umfassend ein Beleuchtungssystem (83),

20 ein Projektionsobjektiv (85) nach einem der Ansprüche 1 bis 19, das eine Struktur tragende Maske (89) auf ein lichtempfindliches Substrat (815) abbildet.

36. Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen mit einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81) nach Anspruch 36.

25 37. Verfahren zur Reduzierung der Doppelbrechung bei einem Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das Projektionsobjektiv eine Mehrzahl von Linsen umfaßt und mindestens zwei Linsen aus einem Fluorid-Kristall bestehen, wobei die mindestens zwei Linsen (100)-Linsen sind, bei denen die Linsenachsen annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls stehen, und die (100)-Linsen zentriert um die optische Achse angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß

30 für ein Strahlbüschel, welches von einem Objektpunkt innerhalb einer Objektebene ausgeht und Strahlen mit jeweils einem Azimuthwinkel α und einem Öffnungswinkel θ in der Objektebene aufweist, die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ in der Bildebene des Projektionsobjektives bestimmt wird, und die (100)-Linsen derart um die optische Achse verdreht werden, daß die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (100)-Linsen aufweist.

35 38. Verfahren zur Reduzierung der Doppelbrechung bei einem Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das Projektionsobjektiv eine Mehrzahl von Linsen umfaßt und mindestens zwei Linsen aus einem Fluorid-Kristall bestehen, wobei die mindestens zwei Linsen (111)-Linsen sind, bei denen die Linsenachsen annähernd senkrecht auf den {111}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls stehen, und die (111)-Linsen zentriert um die optische Achse angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß

40 für ein Strahlbüschel, welches von einem Objektpunkt innerhalb einer Objektebene ausgeht und Strahlen mit jeweils einem Azimuthwinkel α und einem Öffnungswinkel θ in der Objektebene aufweist, die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ in der Bildebene des Projektionsobjektives bestimmt wird, und die (111)-Linsen derart um die optische Achse verdreht werden, daß die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (111)-Linsen aufweist.

45 39. Verfahren zur Reduzierung der Doppelbrechung bei einem Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das Projektionsobjektiv eine Mehrzahl von Linsen umfaßt und mindestens zwei Linsen aus einem Fluorid-Kristall bestehen, wobei die mindestens zwei Linsen (100)-Linsen sind, bei denen die Linsenachsen annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls stehen, und die (100)-Linsen zentriert um die optische Achse angeordnet sind, und mindestens

50 zwei weitere Linsen aus einem Fluorid-Kristall bestehen, wobei die mindestens zwei weiteren Linsen (111)-Linsen sind, bei denen die Linsenachsen annähernd senkrecht auf den {111}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls stehen, und die (111)-Linsen zentriert um die optische Achse angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß

55 für ein Strahlbüschel, welches von einem Objektpunkt innerhalb einer Objektebene ausgeht und Strahlen mit jeweils einem Azimuthwinkel α und einem Öffnungswinkel θ in der Objektebene aufweist, die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ in der Bildebene des Projektionsobjektives bestimmt wird, und die (100)-Linsen und die (111)-Linsen derart um die optische Achse verdreht werden, daß die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (100)-Linsen und (111)-Linsen aufweist.

60 40. Verfahren nach Anspruch 39, wobei sich die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ aus einer (100)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$, welche durch die (100)-Linsen hervorgerufen wird, und einer (111)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$, welche durch die (111)-Linsen hervorgerufen wird, zusammensetzt, wobei die (100)-Linsen derart um die optische Achse verdreht werden, daß die (100)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (100)-Linsen aufweist und wobei die (111)-Linsen derart um die optische Achse verdreht werden, daß die (111)-Doppelbrechungsverteilung $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$ wesentlich reduzierte Werte gegenüber einer nicht verdrehten Anordnung der (111)-Linsen aufweist.

65 41. Linsenherstellverfahren, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Platten aus gegeneinander hinsichtlich der Kri-

DE 101 25 487 A 1

stallorientierung verdrehtem Kristallmaterial, vorzugsweise Fluoridkristall und insbesondere Kalziumfluorid, optisch nahtlos gefügt, insbesondere angesprengt werden und anschließend als ein einheitliches Blank formgebend bearbeitet und poliert werden.

42. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 41, wobei zwei (111)-Platten optisch nahtlos gefügt werden, deren Flächennormale in <111>-Kristallrichtung oder dazu äquivalenten Kristallrichtungen weist, wobei die (111)-Platten Bezugssrichtungen aufweisen, welche senkrecht zu den Flächennormalen stehen und in eine Hauptkristallrichtung zeigen, wobei zwischen den Bezugssrichtungen der zwei (111)-Platten ein Drehwinkel β definiert ist, wobei für den Drehwinkel β gilt:

$$\beta = 60^\circ + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ \text{ wobei } m \text{ eine ganze Zahl ist.}$$

43. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 42, wobei die (111)-Platten eine annähernd gleiche Dicke aufweisen.

44. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 41, wobei zwei (100)-Platten optisch nahtlos gefügt werden, deren Flächennormale in <100>-Kristallrichtung oder dazu äquivalenten Kristallrichtungen weist, wobei die (100)-Platten Bezugssrichtungen aufweisen, welche senkrecht zu den Flächennormalen stehen und in eine Hauptkristallrichtung zeigen, wobei zwischen den Bezugssrichtungen der zwei (100)-Platten ein Drehwinkel γ definiert ist, wobei für den Drehwinkel γ gilt:

$$\gamma = 45^\circ + 1 \cdot 90^\circ \pm 10^\circ \text{ wobei } 1 \text{ eine ganze Zahl ist.}$$

45. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 44, wobei die (100)-Platten eine annähernd gleiche Dicke aufweisen.

46. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 40, wobei zwei (100)-Platten und zwei (111)-Platten optisch nahtlos gefügt werden, wobei die Flächennormale der (100)-Platten in <100>-Kristallrichtung oder dazu äquivalenten Kristallrichtungen weist und die Flächennormale der (111)-Platten in <111>-Kristallrichtung oder dazu äquivalenten Kristallrichtungen weist, wobei die (100)-Platten und die (111)-Platten jeweils Bezugssrichtungen aufweisen, welche senkrecht zu den Flächennormalen stehen und in eine Hauptkristallrichtung zeigen, wobei zwischen den Bezugssrichtungen der zwei (111)-Platten ein Drehwinkel β definiert ist, wobei für den Drehwinkel β gilt:

$$\beta = 60^\circ + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ \text{ wobei } m \text{ eine ganze Zahl ist, und}$$

wobei zwischen den Bezugssrichtungen der zwei (100)-Platten ein Drehwinkel γ definiert ist, wobei für den Drehwinkel γ gilt:

$$\gamma = 45^\circ + 1 \cdot 90^\circ \pm 10^\circ \text{ wobei } 1 \text{ eine ganze Zahl ist.}$$

47. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 46, wobei die (111)-Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die (100)-Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der ersten zur zweiten Dicke 1.5 ± 0.2 ist.

48. Linse, gekennzeichnet durch die Herstellung nach einem der Ansprüche 41 bis 47.

49. Projektionsobjektiv oder Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 48 umfaßt.

50. Projektionsobjektiv oder Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 40, dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 48 umfaßt.

Hierzu 14 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

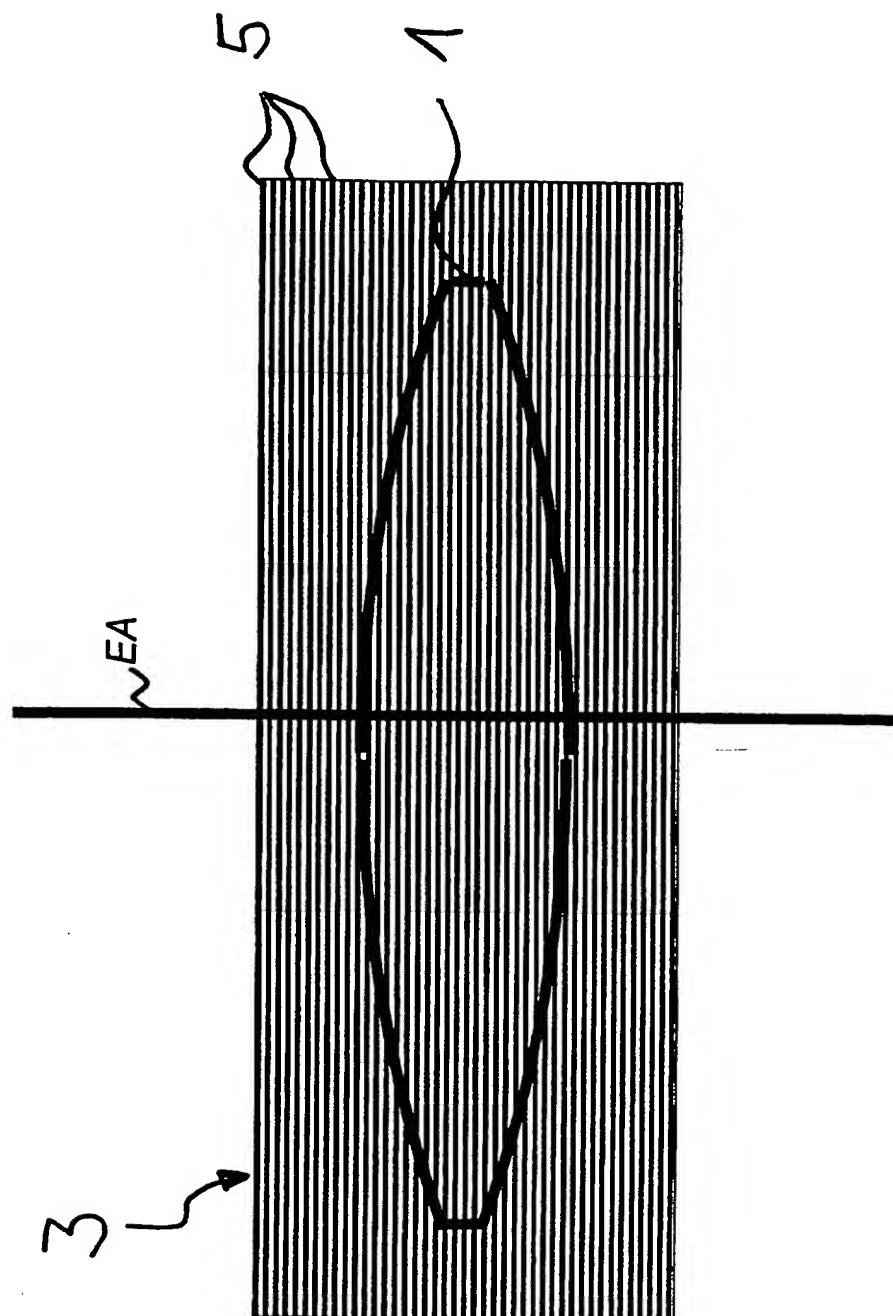


Fig. 1

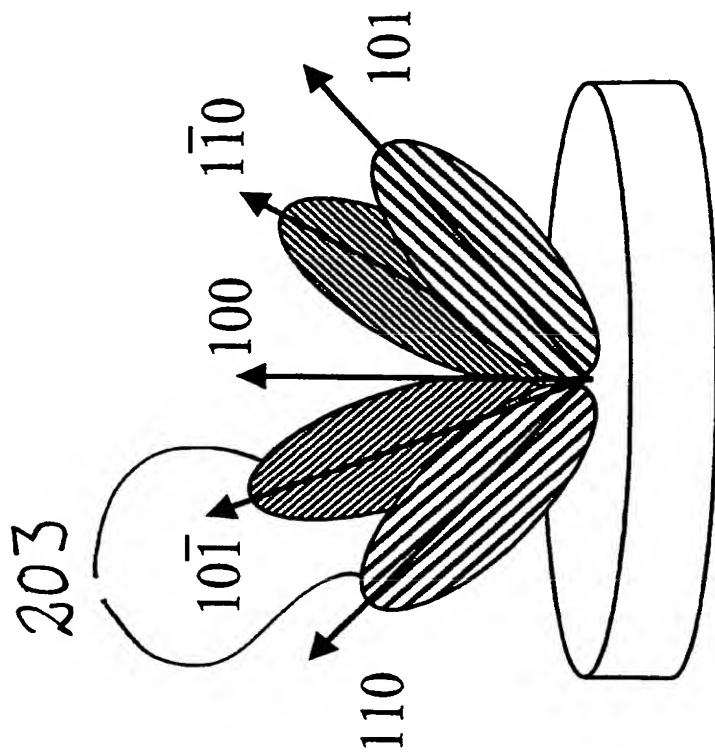


Fig. 2A

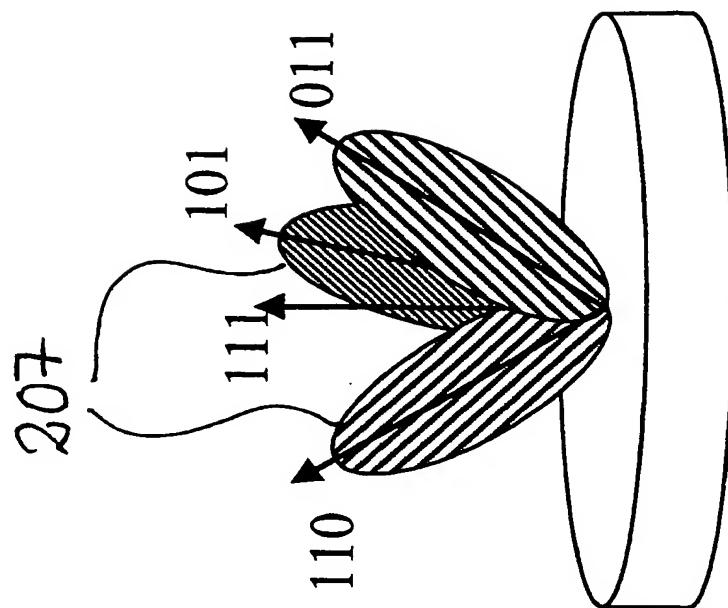


Fig. 2B

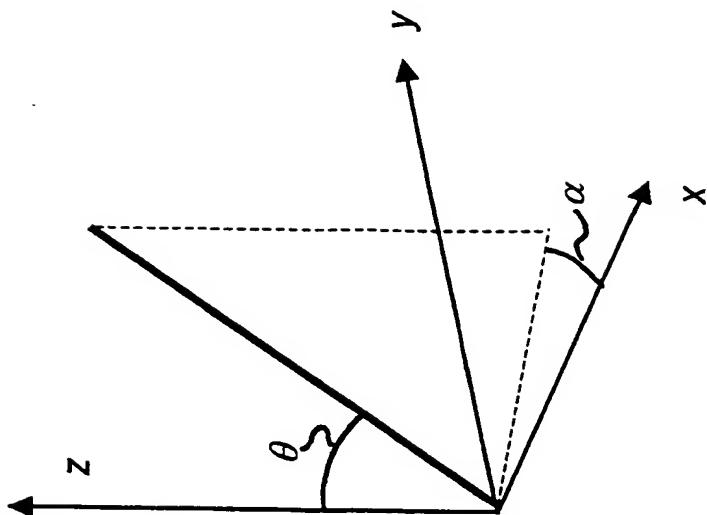
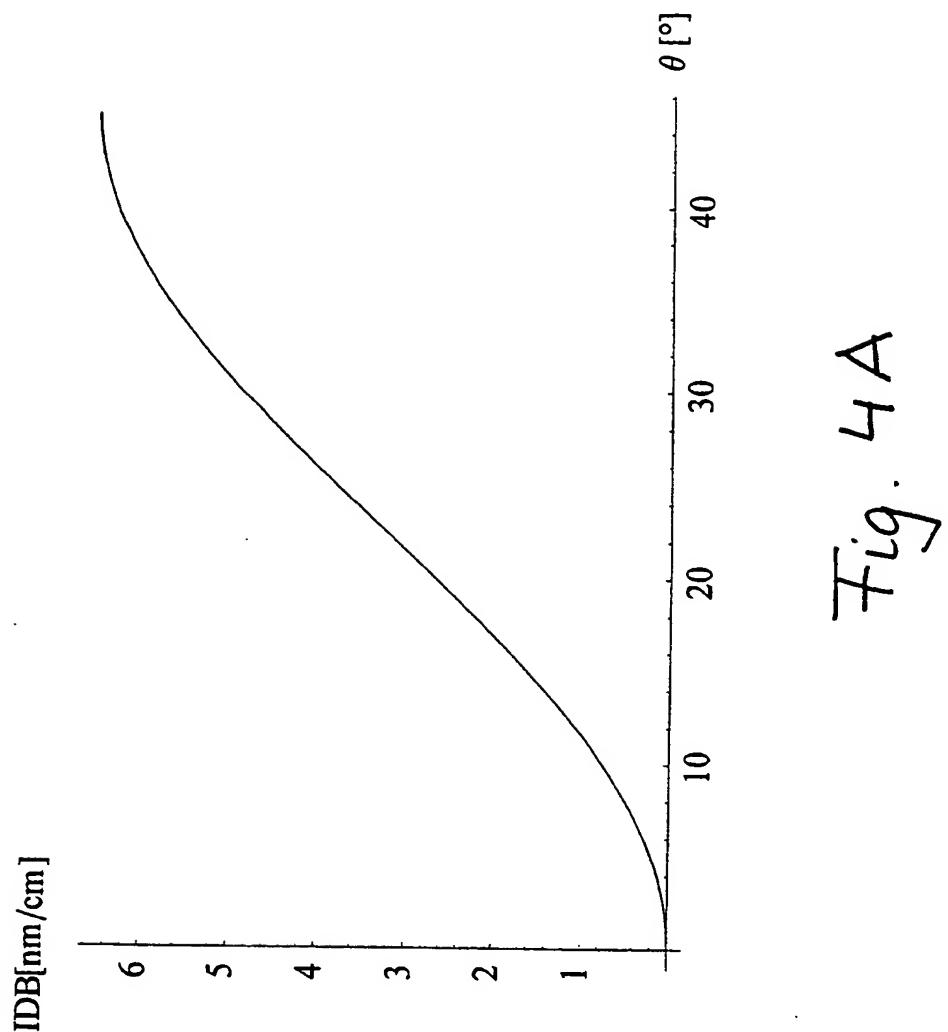


Fig. 3



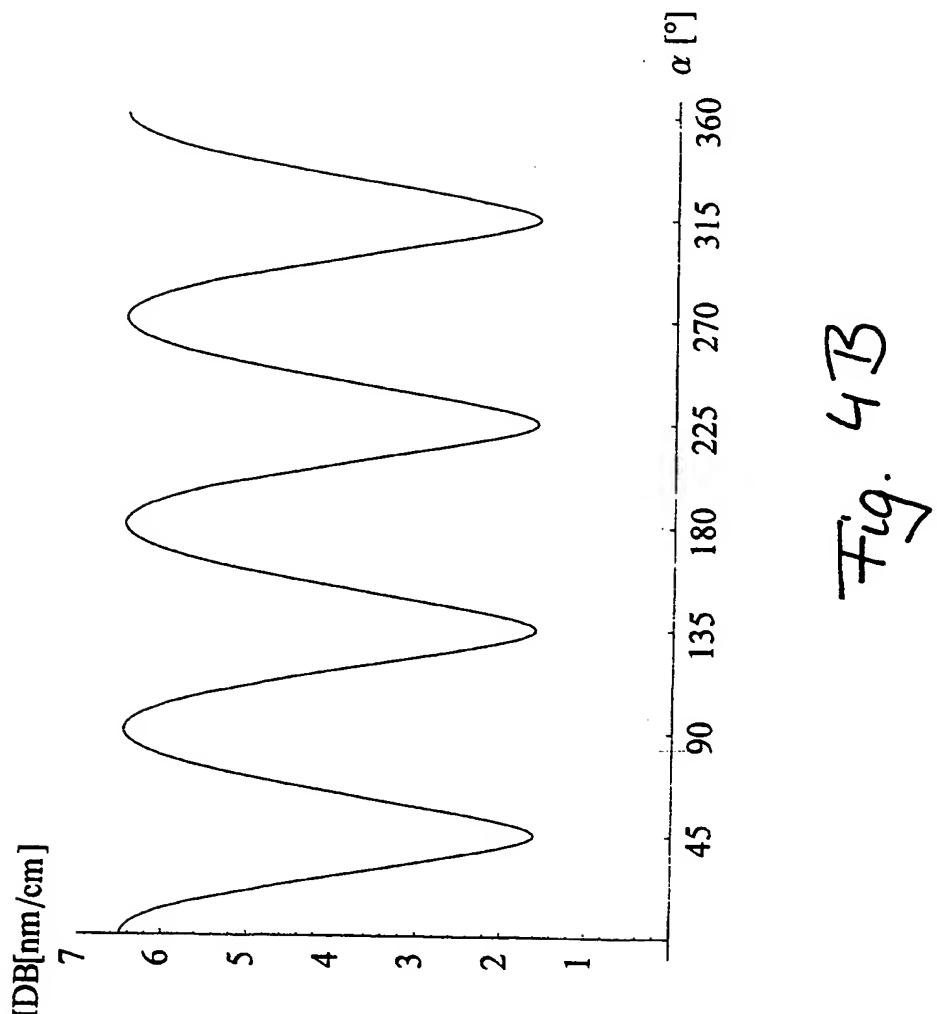
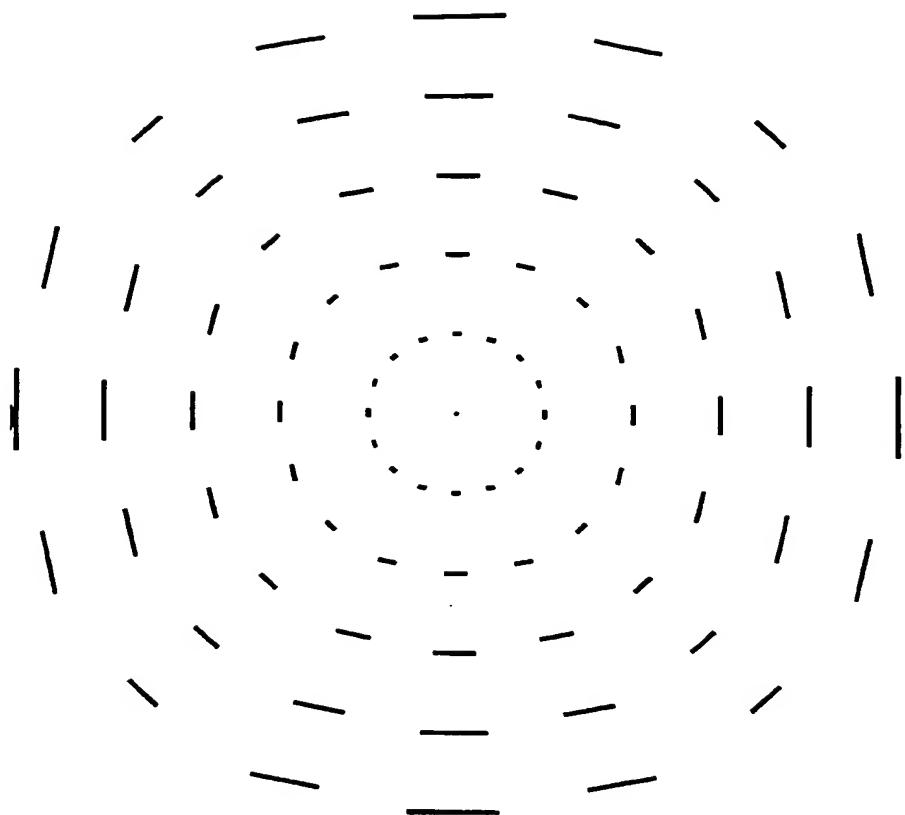


Fig. 4 B



4 C
Tig.

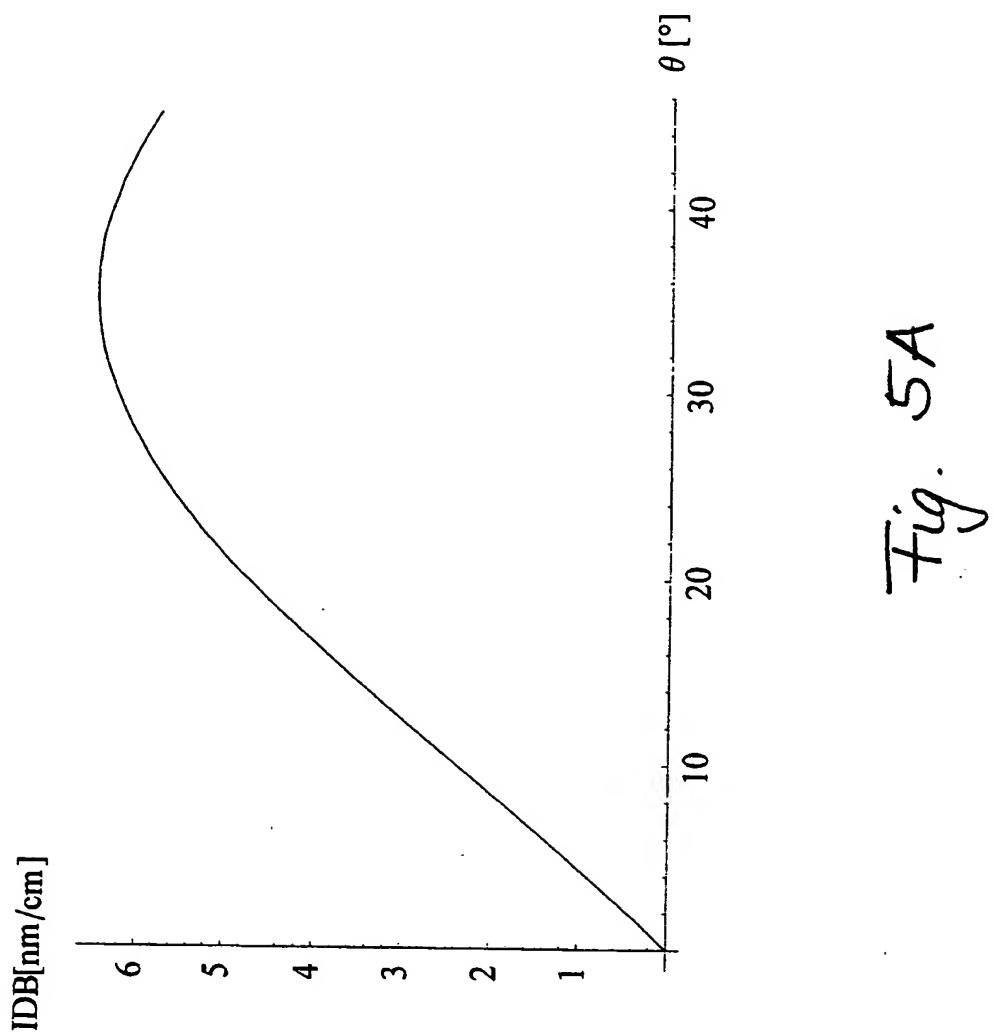


Fig. 5A

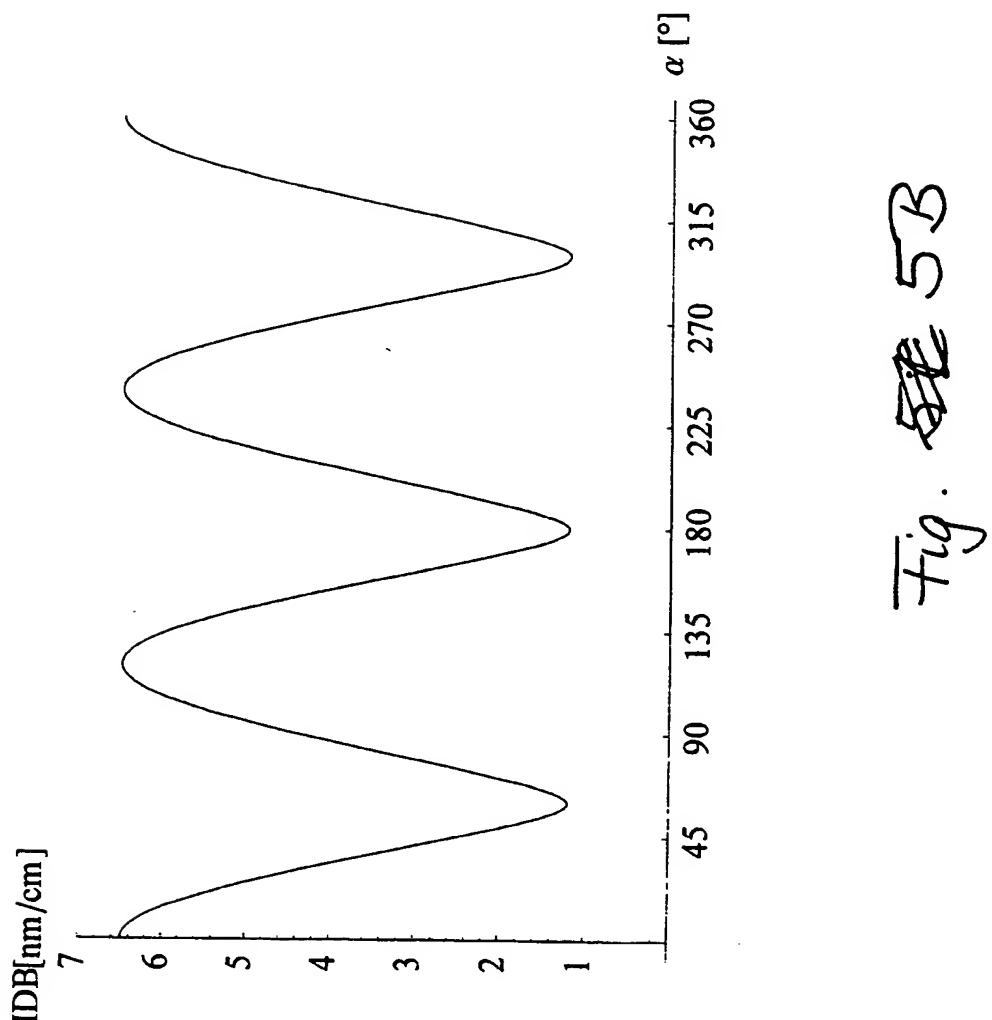


Fig. 5B

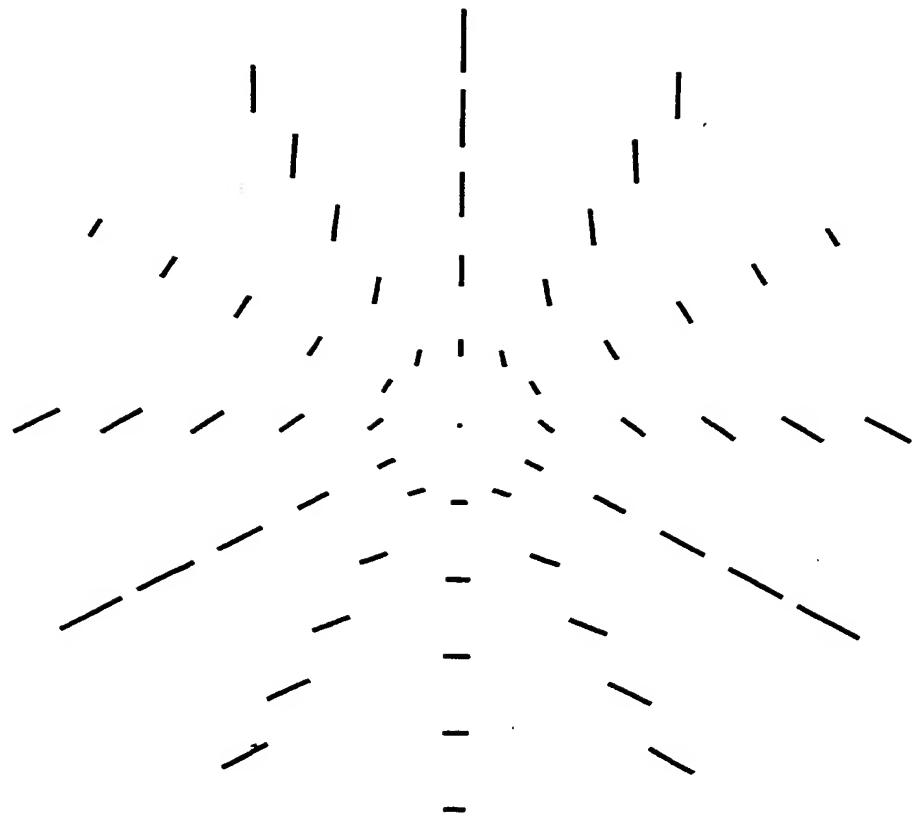
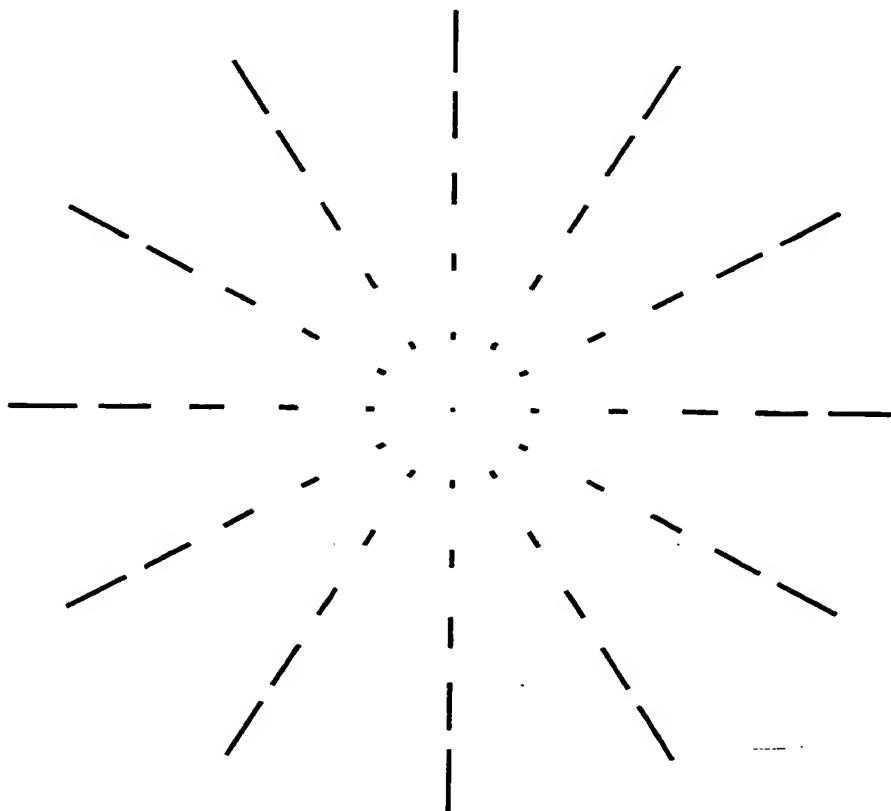


Fig. 5C



15
fig.

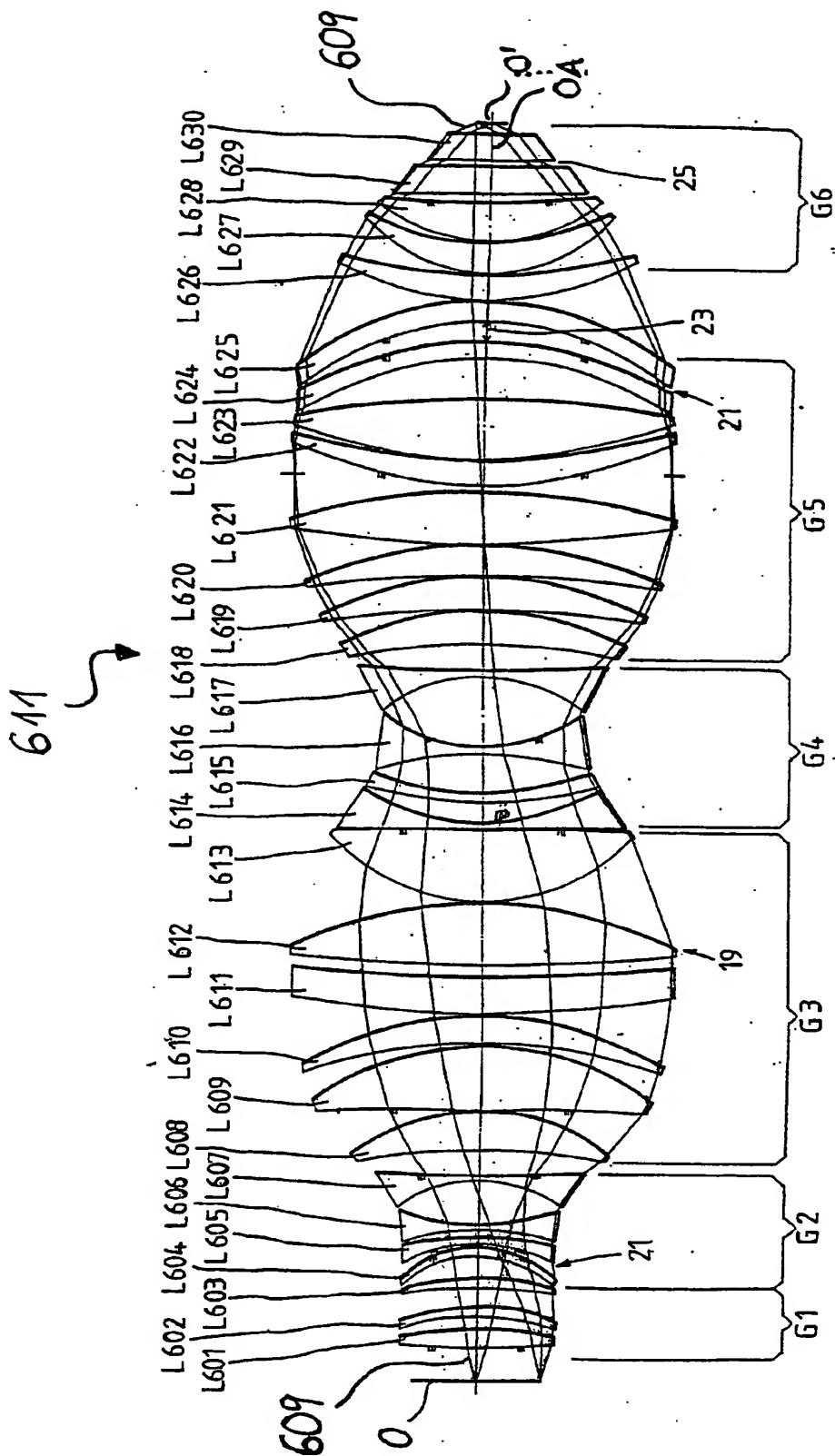


Fig. 6

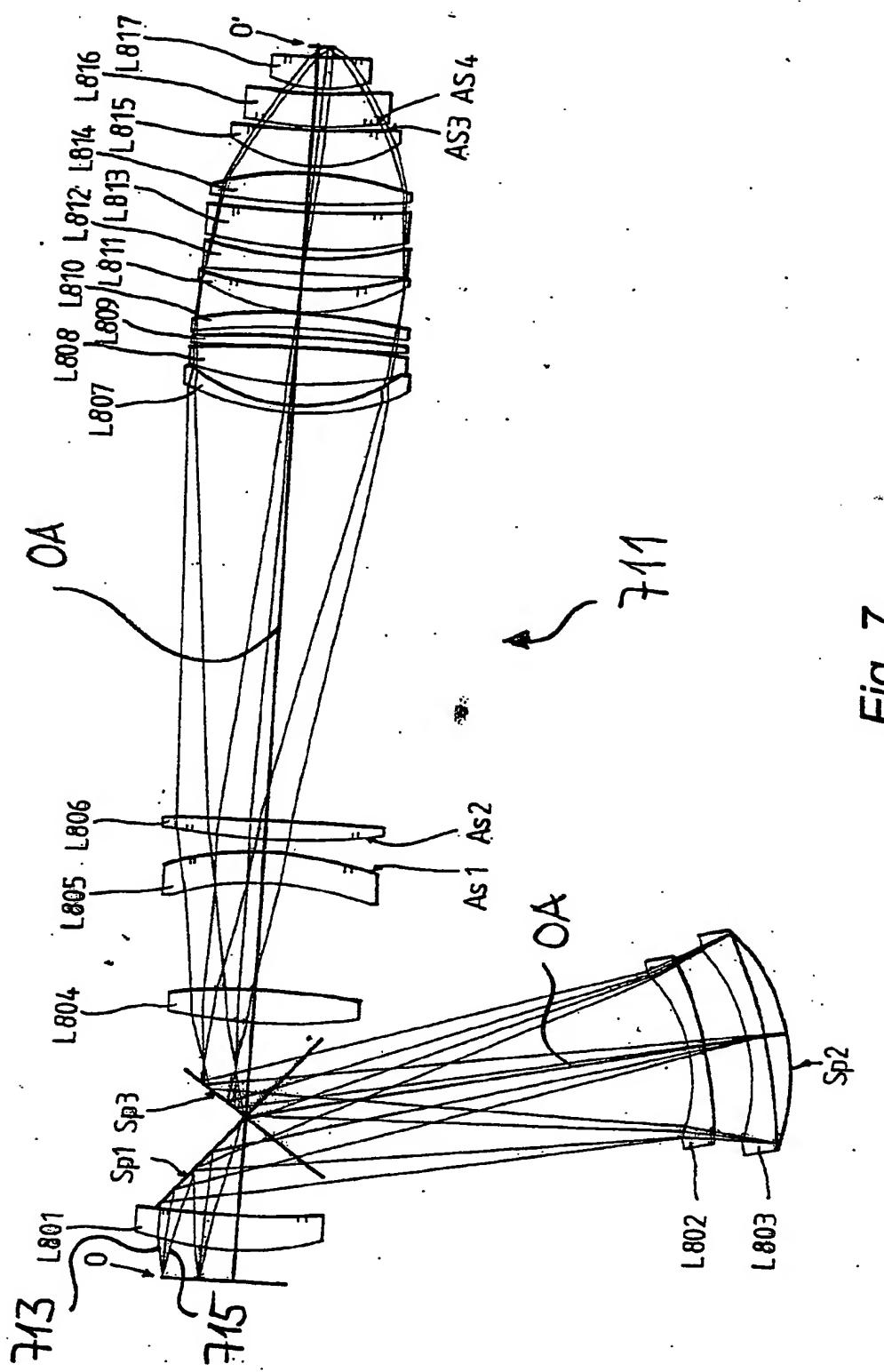


Fig. 7

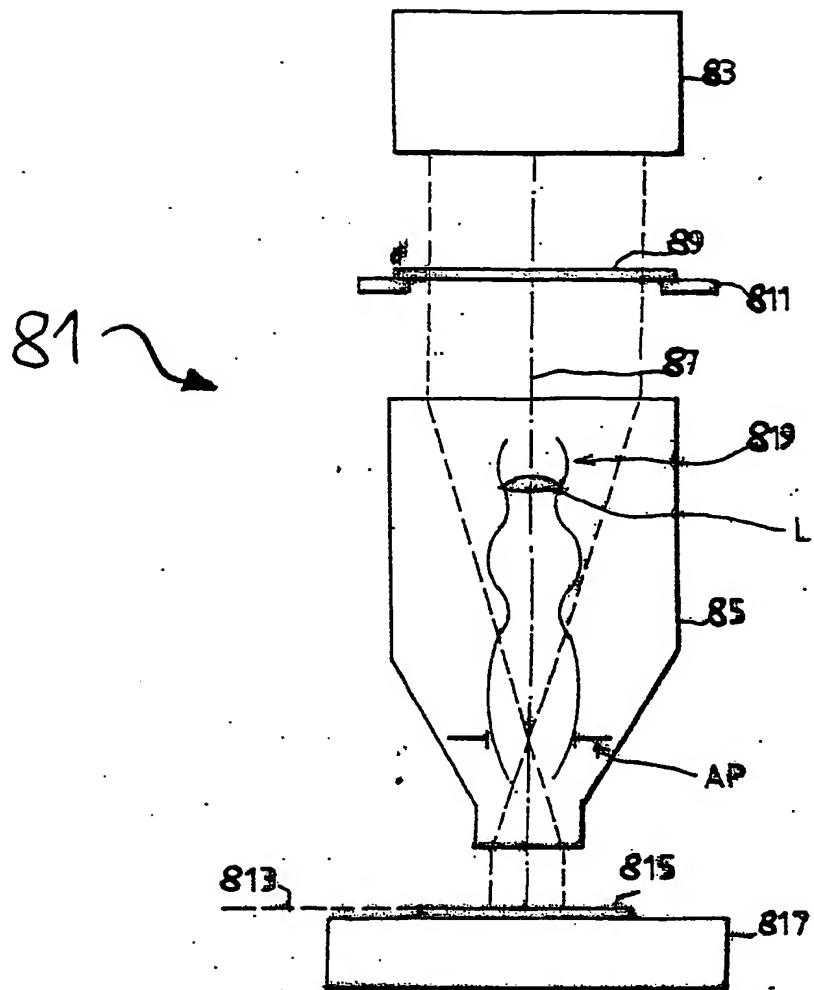


Fig. 8

(19) Federal Republic
of Germany



German
Patent and
Trademark Office

(12) **Unexamined Application**

(51) Int. Cl.⁷:
G 03 F 7/20

(10) **DE 101 25 487 A1**

(21) Application No.: 101 25 487.3

(22) Application Date: May 23, 2001

(43) Disclosure Date: January 2, 2003

DE 101 25 487 A1

(71) Applicant:

Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, Germany

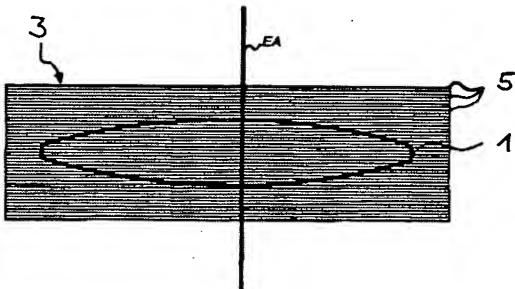
(72) Inventors:

Martin Brunotte, 73431 Aalen, Germany;
Winfried Kaiser, 73431 Aalen, Germany;
Michael Gerhard, 73432 Aalen, Germany;
Manfred Maul, 73434 Aalen, Germany;
Christian Wagner, 73430 Aalen, Germany;
Dr. Daniel Krähmer, 73431 Aalen, Germany;
Wilhelm Ulrich, 73434 Aalen, Germany;
Aalen, Germany; Birgit Enkisch, 73447
Oberkochen, Germany

The following text is based on the documents submitted by the applicant

(54) Optical Element, Projection Lens System and Microlithographic Projection Exposure System with Fluoride Crystal Lenses

(57) Projection lens system for a microlithographic projection exposure system having a plurality of lenses, in which at least one lens is made of a fluoride crystal. This lens is a (100) lens with a lens axis that is approximately normal to the {100} crystal planes or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. To reduce the values of the birefringence distribution, (100) lenses of a group are rotated in opposite directions. This method can also be applied to (111) lenses in which the lens axes are approximately normal to the {111} crystal planes or to the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. A further reduction in the interfering influence of birefringence is achieved by the simultaneous use of groups with (100) lenses rotated in opposite directions and groups with (111) lenses rotated in opposite directions.



DE 101 25 487 A1

FEDERAL PRINTING PLANT 10.02 102 610/41/1

Description

[0001] This invention relates to a projection lens system according to the preamble of Claim 1.

[0002] Such projection lens systems are known from U.S. Patent 6,201,634 where it is disclosed that ideally the lens axes are aligned normal to the {111} crystal planes of the fluoride crystals in the manufacture of fluoride crystal lenses in order to minimize stress birefringence. U.S. Patent 6,201,634 is based on the assumption here that fluoride crystals do not have any intrinsic birefringence.

[0003] The Internet publication "Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF₂" by John H. Burnett, Eric L. Shirley and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg, MD 20899 USA (distributed on May 7, 2001), however, discloses the fact that calcium fluoride single crystals also have birefringence that is not stress induced, i.e., it is intrinsic birefringence. The measurements presented there show in propagation of beams in the <110> crystal direction, a birefringence of (6.5 ± 0.4) nm/cm occurs at a wavelength of $\lambda = 156.1$ nm, or (3.6 ± 0.2) nm/cm at a wavelength of $\lambda = 193.09$ nm and (1.2 ± 0.1) nm/cm at a wavelength of $\gamma = 253.65$ nm for calcium fluoride. In the case of beam propagation in the <100> crystal direction and in the <111> crystal direction, calcium fluoride does not have any intrinsic birefringence, however, as also predicted by the theory. The intrinsic birefringence thus depends greatly on direction and increases significantly at smaller wavelengths.

[0004] On the basis of the symmetry properties of cubic crystals, statements regarding beam propagation in the <110> crystal direction made below also always apply to beam propagation in <101>, <10̄1>, <1̄01>, <1̄0̄1>, <011>, <0̄11>, <01̄1>, <0̄1̄1>, <1̄10>, <1̄1̄0> [sic; <1̄1̄0>] and <1̄1̄0> crystal directions. The same thing is also true of statements regarding beam propagation in the <100> crystal direction, <010> crystal direction and <001> crystal direction, i.e., crystal directions where the index "1" has a negative sign, i.e., "1." The crystal direction always indicates the direction of the surface normals to the corresponding crystal plane. For example, the crystal direction <100> points in the direction of the surface normals of the crystal plane {100}. Statements regarding the crystal directions which are equivalent on the basis of crystal symmetry and are usually obtained only by permutation of the digits "0," "1" and "1" are therefore not explained explicitly but instead are also to be understood implicitly when statements are made regarding one of these crystal directions, i.e., crystal planes.

[0005] Projection lens systems and microlithographic projection exposure systems are known from the patent application PCT/EP 00/13184 by the present patent application and the publications cited therein, for example. The exemplary embodiments in this patent application show suitable purely refractive and catadioptric projection lens systems with numeric apertures of 0.8 and 0.9 at an operating wavelength of 193 nm and 157 nm.

[0006] Rotation of the lens elements to compensate for birefringence effects is also described in the patent application "Projection exposure system for microlithography, optical system and manufacturing process" with the patent applicant's reference number 010559) and the filing date of May 15, 2001. The content of that patent application shall also be considered part of the present patent application.

[0007] The object of this invention is to provide projection lens systems for a microlithographic projection exposure system in which the influence of intrinsic birefringence is minimized.

[0008] This object is achieved with a projection lens system according to Claims 1, 17, 26 and 49, a microlithographic projection exposure system according to Claim 35 and a method of manufacturing semiconductor components according to Claim 36 and a method of reducing birefringence according to Claims 37, 38 and 39.

[0009] Advantageous embodiments of this invention are derived from the features of the dependent claims.

[0010] To minimize the influence of intrinsic birefringence, Claim 1 proposes aligning the lens axes in lenses of fluoride crystal so that they coincide with the <100> crystal direction except for a maximum deviation of 5°. Not all fluoride crystal lenses of the projection lens system must have such an orientation of the crystal planes. The lenses in which the lens axes are normal to the {100} crystal planes are also referred to below as (100) lenses. The orientation of the lens axis in the <100> crystal direction has the advantage that the interfering influence of intrinsic birefringence which results with propagation of light in the <110> crystal direction becomes noticeable only at higher aperture angles of the beams of light than for an orientation of the lens axis in the <111> crystal direction. The aperture angle in this context is understood to refer to the angle between a beam of light and the optical axis outside of a lens and between the beam of light and the lens axis inside a lens. Only when the aperture angles are in the range of the angle between the <100> crystal direction and the <110> crystal direction do the corresponding beams of light show the influence of

birefringence. The angle between the $<110>$ crystal direction and the $<100>$ crystal direction amounts to 45° here. However, if the lens axis were oriented in the $<111>$ crystal direction, then the interfering influence of intrinsic birefringence would be noticeable even at smaller aperture angles because the angle between the $<110>$ crystal direction and the $<111>$ crystal direction amounts to only 35° .

[0011] If the angle dependence of birefringence is caused, for example, by the process used to manufacture the fluoride crystal or by mechanical stress on the lens, then the proposed approaches that have been disclosed may of course also be used to reduce the interfering influence of birefringence.

[0012] The lens axis is defined for example by an axis of symmetry of a rotationally symmetrical lens. If the lens does not have an axis of symmetry, then the lens axis may be drawn through the center of an incident beam bundle or by a straight line with regard to which the beam angles of all light beams within the lens are minimal. Possible lenses include, for example, refractive and diffractive lenses as well as correction layers with free-form correction surfaces. Planar layers are also regarded as lenses if they are situated in the beam path of the projection lens system. The lens axis of a planar layer stands normal to the planar lens surfaces.

[0013] Preferably, however, the lenses are rotationally symmetrical lenses.

[0014] Projection lens systems have an optical axis which runs from the object plane to the image plane. The (100) lenses are preferably designed to be centered about this optical axis so that the lens axes also coincide with the optical axis.

[0015] In the case of projection lens systems having large numeric apertures on the image side, e.g., in particular greater than 0.7 , aperture angles greater than 25° , in particular greater than 30° occur within the (100) lenses. Especially with these large aperture angles, this invention is effective in orienting the lens axes in the $<100>$ crystal direction. If the lens axes were oriented in the $<100>$ crystal direction, light beams with aperture angles greater than 25° , in particular greater than 30° , would definitely show the interfering influence of birefringence which in this case is at a maximum for aperture angles of 35° .

[0016] On the other hand, since the interfering influence of intrinsic birefringence may be at its maximum at an aperture angle of 45° , it is advantageous to design the projection lens system so that all aperture angles of the light beams are smaller than 45° , in particular less than or equal to

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

where NA denotes the numeric aperture on the image side and n_{FK} is the refractive index of the fluoride crystal. The term

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

denotes the aperture angle which corresponds to the numeric aperture on the image side within a fluoride crystal lens when there is no birefringence at the interface. This is achieved by the fact that the lenses which are close to the image plane have convergent lens surfaces, planar lens surface or at most slightly dispersive lens surfaces when the dispersive lens surface is followed in the direction of light by a more convex lens surface.

[0017] Large aperture angles occur mainly with lenses near field planes, in particular the image plane. The (100) lenses should therefore be used preferably in the area of field planes. The range in which the (100) lenses should be used can be determined on the basis of the ratio of the lens diameter to the diameter of the aperture. Thus the lens diameter of the (100) lenses preferably amounts to a maximum of 85%, in particular a maximum of 80% of the aperture diameter.

[0018] In the case of projection lens systems, the largest aperture angles usually occur in the lens situated closest to the image plane. Therefore, the lens axis of this lens is preferably oriented in the direction of the <100> crystal direction.

[0019] Intrinsic birefringence depends not only on the aperture angle of a light beam but also on the azimuth angle of the light beam. The azimuth angle of a light beam is determined as follows: If the lens axis is oriented in the <100> crystal direction, for example, then the white beam is projected into the {100} crystal plane. Likewise the direction vectors of the <101>, <110>, <10̄1> and <1̄10> crystal directions are projected into the {100} crystal plane with maximum intrinsic birefringence. The azimuth angle is then determined between the projected beam of light and the projected direction vector of the <110> crystal direction. The corresponding definitions of course also apply to the cases in which the lens axis is oriented in the <010> crystal direction or in the <001> crystal direction. The intrinsic birefringence of an individual lens has a four-fold azimuthal symmetry when the lens axis is oriented in the <100> crystal direction. A maximum intrinsic birefringence is obtained for azimuth angles of 0°, 90°, 180° and 270°, whereas it almost disappears for angles of

45°, 135°, 225° and 315°. The angle dependence of the intrinsic birefringence can be represented by the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ which is obtained for a beam bundle emanating from an object point in the object plane. Each beam of the beam bundle has the aperture angle θ with respect to the optical axis of the projection lens system and has the azimuth angle α with respect to a reference direction in the object plane. The birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is determined in the image plane after the beam bundle has propagated through the entire projection lens system. For each beam of the beam bundle the optical path differences between two linear polarization states in each lens orthogonal to one another are determined and added up. The sum of the optical path differences is then divided by the sum of the beam paths within the lenses for the respective beam. The resulting values yields the birefringence distribution. However, the birefringence distribution may also be given for the influence of individual lenses by analyzing the optical path differences for the individual lenses. If using a plurality of (100) lenses in a projection lens system, then it is advantageous if the (100) lenses are arranged so they are rotated in opposite directions about the optical axis. This makes it possible to avoid additive superpositioning of the interfering influence due to the intrinsic birefringence when the (100) lenses are installed with the same orientation. Due to the rotated arrangement of the (100) lenses, the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ can be reduced significantly in its absolute value. Thus the maximum birefringence value can be reduced by up to 20%, in particular by up to 25% in comparison with installation of the (100) lenses with the same orientation.

[0020] Due to the rotated installation of the (100) lenses, it is possible to significantly reduce the dependence on the azimuth angle α in particular, so that the result is a birefringence distribution having virtual rotational symmetry.

[0021] The mutual orientation of the (100) lenses is defined by the angle of rotation β indicating the angle between two reference directions. The reference direction of a (100) lens is normal to the lens axis and points in one main crystal direction. The main crystal directions for the (100) lenses are the <010> crystal direction, the <001> crystal direction, the <010> crystal direction or the <001> crystal direction. To reduce the birefringence, a group of (100) lenses is advantageously considered, where the (100) lenses are rotated in opposite directions so that the angle of rotation is obtained as follows for two (100) lenses of a group:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

where n denotes the number of (100) lenses of a group and m denotes a natural number. If the group includes two (100) lenses, then the angle of rotation between these two lenses is ideally 45° or 135° , 225° , ... Since the (100) lenses have a four-fold azimuthal symmetry, then the correction of birefringence is invariant with respect to the rotations of the (100) lenses by 90° . This degree of freedom as well as the tolerance of $\pm 5^\circ$ can be used for traditional adjustment of the projection lens system to correct for non-rotational symmetry interference, for example.

[0022] The lenses of a group are determined, for example, by the fact that an outermost aperture beam of a beam bundle has similar aperture angles within each of these lenses, whereby advantageously the aperture angles of the outermost of the aperture beam within these lenses are greater than 15° , in particular greater than 20° . The outermost aperture beam is defined as a beam which emanates from an object point whose beam height in the plane of the aperture corresponds to the radius of the aperture and which thus has an angle in the image plane according to the numeric aperture on the image side. The outermost aperture beams are therefore used for definition of the groups because they usually have the largest aperture angles within the lenses and thus experience the greatest interference due to birefringence. Determining the optical path difference for two mutually orthogonal linear polarization states for the outermost aperture beams thus permits conclusions to be drawn regarding the maximum interference of a wave front due to birefringence.

[0023] In addition, it is advantageous if the outermost aperture beam in these lenses travels the same beam path in each case. These measures result in good compensation of the birefringence contributions caused by the individual lenses of a group.

[0024] It is advantageous for optimum compensation of the lenses of a group if the outermost aperture beam in each of the lenses experiences similarly large optical path difference between two mutually orthogonal linear polarization states. The electromagnetic field components here define the polarization state of the beam.

[0025] In the case of two plane-parallel adjacent lenses, an almost rotationally symmetrical birefringence distribution is obtained by rotation of the two lenses. Even in the case of lenses with curved surfaces, through skilled selection of the lenses or through an appropriate choice of thicknesses and radii of the lenses, an approximately rotationally symmetrical birefringence distribution can be achieved by rotating two (100) lenses.

[0026] Rotation of the individual (100) lenses in opposite directions is especially effective when the (100) lenses are arranged adjacent to one another. It is especially advantageous to divide a lens into two parts and then wring the two lens halves so they are rotated in opposite directions. Another advantageous embodiment involves manufacture of a lens of one block of material previously produced by wringing two (111) layers rotated by 60° and two (100) layers rotated by 45°.

[0027] In the case of a projection lens system having a plurality of lenses, it is advantageous to form multiple groups of (100) lenses. In doing so the (100) lenses of a group are rotated so that the birefringence distribution of the group has a curve which is virtually independent of the azimuth angle.

[0028] The principle of reducing birefringence by rotating (100) lenses in opposite directions can also be used to advantage with fluoride crystal lenses in which the lens axes are normal to the {111} crystal planes or equivalent crystal planes except for a deviation of 5°, for example, the {1̄11} crystal planes or the {11̄1} crystal planes. These lenses are referred to as below (111) lenses.

[0029] The intrinsic birefringence of a single lens as a trigonal azimuthal symmetry if the lens axis is oriented in the <111> crystal direction. A maximum intrinsic birefringence is then obtained by azimuth angles of 0°, 120° and 240°, while it disappears for angles of 60°, 180° and 300°. The same statements as those made for the rotation of (100) lenses also applied to the rotation of (111) lenses except for the specification of ideal angles of rotation γ if the birefringence is to be reduced with a group of (111) lenses. For pairs of two (111) lenses of this group, the angle of rotation is given as follows:

$$\beta = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 8^\circ,$$

where k is the number of (111) lenses of a group and l is a natural number. If the group includes two (111) lenses, then the angle of rotation between the two lenses is ideally 60° or 180°, 300° ...

[0030] While the birefringence distribution is virtually independent of the azimuth angle here due to the rotation of (100) lenses in opposite directions and/or rotation of (111) lenses in opposite directions, the absolute value of the birefringence distribution can be reduced significantly by the fact that the projection lens system has a group of (100) lenses as well as a group of (111) lenses. This is possible because the birefringence not only has an absolute value but also has a direction. If we consider now the (100) birefringence which is induced by a group of (100) lenses with an optimized

angle of rotation and the (111) birefringence which is produced by a group of (111) lenses with an optimized angle of rotation, then the direction of the (100) birefringence is rotated by almost 90° to the direction of the (111) birefringence. If the absolute values of the (100) birefringence are just as large as the absolute values of the (111) birefringence, then the two birefringence distributions almost completely compensate for one another. Due to the simultaneous use of a group having (100) lenses and a group having (111) lenses, it is therefore possible to reduce the maximum value of the birefringence such that it amounts to only 20% of the maximum value of the birefringence that would be obtained if only (111) lenses or only (100) lenses were used, in particular for lenses having large aperture angles.

[0031] Preferably calcium fluoride is used as the material for the lenses in projection lens systems because calcium fluoride is especially suitable for color correction when used together with quartz at a working wavelength of 193 nm and it provides adequate transmittance at a working wavelength of 157 nm. However, the statements made here are also applicable for the fluoride crystals strontium fluoride or barium fluoride because these are also crystals of the same cubic crystal type.

[0032] The interfering influence of the intrinsic birefringence is also manifested in particular when the light beams have large aperture angles within the (100) lenses or (111) lenses. This is the case for projection lens systems which have a numeric aperture on the image side which is greater than 0.7, in particular greater than 0.8.

[0033] Intrinsic birefringence increases definitely with a decrease in working wavelength. Thus the intrinsic birefringence at a wavelength of 193 nm is more than twice as great as that at a wavelength of 157 nm, more than five times as great as that of a wavelength of 248 nm. Therefore, this invention can be used to particular advantage when the light beams have wavelengths smaller than 200 nm, in particular smaller than 160 nm.

[0034] The projection lens system may be a purely refractive lens system consisting of a plurality of lenses arranged in rotational symmetry around the optical axis.

[0035] However the imaging performance is also improved in the case of projection lens system of the catadioptric lens system type when the lenses with large aperture angles of the light beams are oriented so that the axes of symmetry of the lenses point in the <100> crystal direction and/or in the case of groups of (100) or (111) fluoride crystal lenses, when the lenses are arranged so they are rotated in opposite directions.

[0036] Such projection lens systems can be used to advantage in microlithographic projection exposure systems which include an illumination system, a mask positioning system, a structure-carrying mask, a projection lens system, an object positioning system and a light-sensitive substrate in this order, starting from the light source.

[0037] Microstructure semiconductor components can be produced with this microlithographic projection exposure system.

[0038] This invention also makes available suitable methods for significantly reducing birefringence. This method is used here with a projection lens system, which includes at least two fluoride crystal lenses in the <100> orientation or in the <111> orientation. Of these lenses, the position of the reference directions is also known, these reference directions being defined by the main crystal directions which are orthogonal to the <100> crystal direction and/or the <111> crystal direction. This method makes use here of the inventive finding that by rotation of the fluoride crystal lenses about the optical axis, the maximum values of the birefringence distribution can be significantly reduced. By suitable simulation methods, a beam bundle emanating from an object point is propagated through a projection lens system and the birefringence distribution in the image plane is determined on the basis of the known optical properties of the fluoride crystal lenses. In an optimization step, the fluoride crystal lenses are rotated until the birefringence reaches tolerable values. The optimization step can also take into account other boundary conditions such as compensation of non-rotationally symmetrical lens defects due to turning of the lens, which improve the imaging performance of the lens system on the whole. Due to this optimization step, the maximum value of the birefringence can be reduced by up to 30%, in particular by up to 50%, in comparison with a projection lens system in which the fluoride crystal lens are arranged with the same orientation. This optimization method may also have an intermediate step. In this intermediate step, groups are formed from the fluoride crystal lenses with lenses which each generate a similar optical path difference between two mutually orthogonal linear polarization states for an outermost aperture beam. Then in the following optimization step, the lenses are only rotated within the groups to reduce the birefringence.

[0039] The method described here can be used to particular advantage especially when one or more groups of (111) lenses are used in the projection lens system in addition to one or more groups of (100) lenses. The optimization step then involves first rotating the (100) lenses so that the (100) birefringence caused by these lenses is reduced and then rotating the (111) lenses so that the (111) birefringence caused by these lenses is reduced. The distribution of the fluoride crystal lenses

between lenses with a (100) orientation and lenses with a (111) orientation must be done in the optimization so that the resulting (100) birefringence and the resulting (111) birefringence are largely compensated.

[0040] This invention is explained in greater detail on the basis of the drawings.

[0041] Figure 1 shows a section through a fluoride crystal block normal to the {100} crystal planes together with a lens of a projection lens system in a schematic diagram;

[0042] Figures 2A through B each show plane-parallel lenses in the (100) orientation and (111) orientation in a schematic three-dimensional diagram;

[0043] Figure 3 shows a coordinate system for definition of the aperture angle and the azimuth angle;

[0044] Figures 4A through D show the birefringence distribution for (100) lenses in various diagrams.

[0045] Figures 5A through D show the birefringence distribution for (111) lenses in various diagrams;

[0046] Figure 6 shows the lens section of a refractive projection lens system;

[0047] Figure 7 shows the lens section of a catadioptric projection lens system and

[0048] Figure 8 shows a microlithographic projection exposure system in a schematic diagram.

[0049] Figure 1 shows schematically a section through a fluoride crystal block 3. This section is selected so that the {100} crystal planes 5 can be seen as individual lines so that the {100} crystal planes 5 are normal to the plane of the paper. The fluoride crystal block 3 serves as the starting material for the (100) lens 1. In this example the (100) lens 1 is a biconvex lens with the lens axis EA which is also the axis of symmetry of the lens. Lens 1 is then cut from the fluoride crystal block in such a way that the lens axis EA is normal to the {100} crystal planes.

[0050] Figure 2A illustrates in a three-dimensional diagram how the intrinsic birefringence relates to the crystal directions when the lens axis EA points in the <100> crystal direction. This shows a circular plane-parallel layer 201 made of calcium fluoride. The lens axis EA here points in the <100>

crystal direction. In addition to the $<100>$ crystal direction, the $<101>$, $<1\bar{1}0>$, $<10\bar{1}>$ and $<110>$ crystal directions are also shown as arrows. The intrinsic birefringence is indicated schematically by four "lobes" 203, the surfaces of which indicate the absolute value of the intrinsic birefringence for the particular beam direction of a light beam. The maximum intrinsic birefringence is obtained in the $<101>$, $<1\bar{1}0>$, $<10\bar{1}>$ and $<110>$ crystal directions, i.e., for light beams with an aperture angle of 45° and an azimuth angle of 0° , 90° , 180° and 270° . For azimuth angles of 45° , 135° , 225° and 315° , minimum values are thus obtained for the intrinsic birefringence. For an aperture angle of 0° , intrinsic birefringence disappears.

[0051] Figure 2B illustrates in a three-dimensional diagram how the intrinsic birefringence relates to the crystal directions when the lens axis EA points in the $<111>$ crystal direction. This shows a circular plane-parallel layer 205 made of calcium fluoride. The lens axis EA here points in the $<111>$ crystal direction. In addition to the $<111>$ crystal direction, the $<011>$, $<101>$ and $<110>$ crystal directions are also shown as arrows. The intrinsic birefringence is represented schematically by three lobes 207, the surfaces of which indicate the absolute value of the intrinsic birefringence for the respective beam direction of a light beam. The maximum intrinsic birefringence is obtained in the $<011>$, $<101>$ and $<110>$ crystal directions, i.e., for light beams having an aperture angle of 35° and an azimuth angle of 0° , 120° and 240° . For azimuth angles of 60° , 180° and 300° , minimum values are obtained for the intrinsic birefringence. The intrinsic birefringence disappears for an aperture angle of 0° .

[0052] The definition of aperture angle θ and azimuth angle α is depicted in Figure 3. For the example shown in Figure 2, the z axis points in the $<100>$ crystal direction and the x axis points in the (010) crystal direction.

[0053] It is known from the Internet publication cited above that measurements with beam propagation in the $<110>$ crystal direction have yielded a birefringence of (6.5 ± 0.4) nm/cm at a wavelength of $\lambda = 156.1$ nm for calcium fluoride. With this measured value as a standardization quantity, the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ can be derived theoretically as a function of crystal structure. To do so, the formalisms known from crystal optics are used to calculate the index ellipsoids as a function of the beam direction. The theoretical principles can be found, for example, in Lexikon der Optik [Encyclopedia of Optics], Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1999 under the heading "Crystal optics."

[0054] Figure 4A shows the intrinsic birefringence as a function of the aperture angle θ for the azimuth angle $\alpha = 0^\circ$ for a (100) lens. The value for the intrinsic birefringence of 6.5 nm/cm at an aperture angle $\theta = 45^\circ$ corresponds to the measured value. The curve was determined according to the equations known from crystal optics.

[0055] Figure 4B shows the intrinsic birefringence as a function of the azimuth angle α for the aperture angle $\theta = 45^\circ$ for a (100) lens. The four-fold symmetry is obvious.

[0056] Figure 4C shows the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ for individual beam directions in the (θ, α) angular space for a (100) lens. Each line represents the absolute value and direction for a beam direction defined by the aperture angle θ [sic; θ] and the azimuth angle α . The length of the lines is proportional to the absolute value of the birefringence, i.e., the difference in the main axis lengths of the cross-sectional ellipse, while the direction of the lines indicates the orientation of the longer main axis of the cross-sectional ellipse.

[0057] The cross-sectional ellipse is obtained by intersecting the index ellipsoid for the beam of the direction (θ, α) with a plane which is normal to the beam direction and passes through the center of the index ellipsoid. Both the directions and the lengths of the lines show that this distribution is a four-fold distribution. The length of the lines and thus the birefringence are at a maximum at the azimuth angles $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ and 270° .

[0058] Figure 4D shows the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ obtained when two adjacent plane-parallel (100) lenses of the same thickness are arranged so they are rotated by 45° . The resulting birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is evidently independent of the azimuth angle α . The longer main axes of the cross-sectional ellipses run tangentially. The resulting optical path differences between two polarization states that are mutually orthogonal are obtained by linking the birefringence values to the path length within the material. Likewise, rotationally symmetrical birefringence distributions are obtained when n plane-parallel (100) lenses of the same thickness are arranged in such a way that the following equation holds for the angles of rotation between two lenses:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$$

where n indicates the number of plane-parallel (100) lenses and m is an integer. In comparison with an arrangement of lenses having the same orientation, the maximum value of the birefringence for the aperture angle $\theta = 30^\circ$ may be reduced by 30%. A rotationally symmetrical birefringence

distribution is also obtained for any lenses when all the beams of a beam bundle in the lenses travel the same aperture angle and the same path lengths within the lenses. Therefore the lenses should be combined into groups so that the beams fulfill the stated condition as well as possible.

[0059] Figure 5A shows the intrinsic birefringence as a function of the aperture angle θ for the azimuth angle $\alpha = 0^\circ$ for a (111) lens. The value for the intrinsic birefringence of 6.5 nm/cm at the aperture angle $\theta = 35^\circ$ corresponds to the measured value. The shape of the curve was determined from equations known in crystal optics.

[0060] Figure 5B shows the intrinsic birefringence as a function of the azimuth angle α for the aperture angle $\theta = 35^\circ$ for a (111) lens. The trigonal symmetry is obvious.

[0061] Figure 5C shows the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ for individual beam directions in the (θ, α) angular space for a (111) lens in the diagram already introduced with Figure 4C. Both the directions and lengths show the trigonal distribution. The lengths of the lines and thus the birefringence are at maximum at azimuth angles of 0° , 120° and 240° . In contrast with a (100) lens the orientation of the birefringence is rotated by 90° when a beam passes through a lens at an azimuth angle of 180° instead of an azimuth angle of 0° . Thus the birefringence can be compensated, for example, by two (111) lenses have the same orientation if the plus or minus signs of the beam angles of a beam bundle are exchanged between the two lenses.

[0062] Figure 5D shows the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ which results when two adjacent plane-parallel (111) lenses of the same thickness are arranged with a 60° rotation. The resulting birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is obvious independent of the azimuth angle α . The longer main axes of the cross-sectional ellipses, however, run radially in contrast with Figure 4C. The resulting optical path differences between mutually orthogonal polarization states are obtained by linking the birefringence values to the path length within the material. Rotationally symmetrical birefringence distributions are likewise obtained when n plane-parallel (111) lenses of the same thickness are arranged in such a way that the following equation holds for the angles of rotation between two lenses:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$$

where k denotes the number of plane-parallel (111) lenses and 1 is an integer. In contrast with an arrangement of lenses having the same orientation, the value of the birefringence for the aperture

angle $\theta = 30^\circ$ can be reduced by 68%. A rotationally symmetrical birefringence distribution is also obtained for any lenses when all the beams of a beam bundle in the lenses travel the same angle and the same path lengths within the lenses. Therefore the lenses should be combined into groups so that the beams satisfy the conditions stated above as well as possible.

[0063] If groups with (100) lenses and groups with (111) lenses are now combined within a projection lens system, the intrinsic birefringence introduced by these lenses can be largely compensated. To do so, it is necessary to first achieve an almost rotationally symmetrical birefringence distribution within these groups by rotation of the lenses and then by combination of a group with (100) lenses and a group with (111) lenses, to compensate the two birefringence distributions. To do so, one makes use of the fact that the orientations of the longer main axes of the cross-sectional ellipses for the birefringence distributions of a group with rotated (100) lenses are normal to the orientations of the longer main axes of the cross-sectional ellipses for the birefringence distribution of a group with rotated (111) lenses, as shown in Figures 4D and 5D. The deciding factor is that first, an almost rotationally symmetrical birefringence distribution is created by the individual groups and second, the sum of the contributions of the groups with (100) lenses is almost the same as the sum of the contributions of the groups with (111) lenses.

[0064] Figure 6 shows the lens section (cross section) of a refractive projection lens system 611 for the wavelength 157 nm. The optical data for this lens system is summarized in Table 1. This exemplary embodiment is from the patent application PCT/EP 00/13148 by the present applicant and corresponds to Figure 7 or Table 6 there. For a more detailed description of the functioning of the lens system, reference is made to the patent application PCT/EP 00/13148. All the lenses of this lens system are made of calcium fluoride crystal. The numeric aperture of the lens system on the image side is 0.9. The imaging power of this lens is corrected so well that the deviation from the wave front of an ideal spherical wave is less than 1.8 $m\lambda$, based on a wavelength of 157 nm. Especially with these high performance lens systems, it is necessary to reduce as much as possible interfering influences such as intrinsic birefringence.

[0065] For the exemplary embodiment in Figure 6, the aperture angles θ and beam paths OP_L of the outermost aperture beam 609 have been calculated for the individual lenses L601 through L630. The outermost aperture beam 609 emanates from the object point with the coordinates $x = 0$ mm and $y = 0$ mm and has an angle in the image plane with respect to the optical axis which corresponds to the image-side numeric aperture. The outermost aperture beam 609 is therefore used because almost the maximum aperture angle within the lenses is obtained for it.

Table 2.

| Lens | Aperture angle θ (°) | Beam path OP_L (mm) | Optical path difference (111) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ (nm) | Optical path difference (111) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 60^\circ$ (nm) | Optical path difference (100) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ (nm) | Optical path difference (100) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 45^\circ$ (nm) |
|-------|-----------------------------|--------------------------|--|---|--|---|
| Total | | [see source for numbers] | | | | |

[0066] In addition to the aperture angles θ and path lengths OP_L for the outermost aperture beam, Table 2 shows the optical path differences between two mutually orthogonal linear polarization states for different lens orientations. The optical path differences are shown for both (111) lenses and for (100) lenses, where the differences in the azimuth angle α_{AR} of the outermost edge beam to the azimuth angle α_L of the lens for a (111) lens amount to 0° and 60° and for a (100) lens amount to 0° and 45° .

[0067] Table 2 shows that the aperture angles θ for the lenses L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 and L630 are greater than 25° , for the lenses L618, L627, L628, L629 and L630 are even greater than 30° . The lenses L627 through L630 which are closest to the plane of the figure are particularly affected by high aperture angles.

[0068] Through the design of the projection lens system, the result has been achieved that the maximum aperture angles of all light beams is less than 45° . The maximum aperture angle for the outermost aperture beam is 39.4° with lens L628. It was helpful to use two thick planar lenses L629 and L630 directly in front of the image plane.

[0069] The diameter of the aperture between the lenses L621 and L622 is 270 mm. The diameter of the lens L618 is 207 mm and the diameters of the lenses L627 through L630 are all smaller than 190 mm. Thus the diameters of these lenses which have high aperture angles are smaller than 80% of the aperture diameter.

[0070] Table 2 shows that it is advantageous for individual lenses having large aperture angles to orient them in the (100) direction because the birefringence values are lower on the whole. This is

due to the fact that with (100) lenses the influence of the symbol <110> crystal directions becomes apparent only at larger angles than with (111) lenses. For example, the optical path differences for the lenses L608, L609 and L617 are more than 30% lower.

[0071] On the basis of the two plane-parallel lenses L629 and L630, it can be demonstrated well how the birefringence can be reduced significantly by rotating the lenses in opposite directions.

[0072] Both lenses have the same aperture angles for the outermost aperture beam of 35.3° and similar beam paths of 27.3 mm or 26.0 mm. If the two lenses were installed with the same orientation as (100) lenses, an optical path difference of 30.7 nm would be the result. However, if the two (100) lenses are rotated by 45° in opposite directions, the optical path difference is reduced to 20.9 nm, i.e., it is reduced by 32%. If the two lenses were installed with the same orientation as (111) lenses, the resulting optical path difference would be 34.6 nm. However, when the two (111) lenses are rotated by 60° in opposite directions, the optical path difference is reduced to 13.6 nm, i.e., 61%.

[0073] Almost compensation of the optical path differences for two mutually orthogonal linear polarization states on the basis of the intrinsic birefringence produced by lenses L629 and L630 can be achieved when the lens L629 is split into the lenses L6291 and L6292 and when the lens L630 is split into the lenses L6301 and L6302, where the lens L6291 is a (100) lens with a thickness of 9.15 mm, lens L6292 is a (111) lens with a thickness of 13.11 mm, the lens L6301 is (100) lens with a thickness of 8.33 mm and the lens L6302 is a (111) lens with a thickness of 12.9? [sic] mm. The lenses L6291 and L6301 are rotated by 45° in opposite directions, while lens L6292 and L6302 are rotated by 60°. The resulting maximum optical path difference in this case amounts to 0.2 nm. The lenses L6291 and L6292, as well as the lenses L6301 and L6302 can be joined together optically seamlessly, e.g., by wringing. This principle can also be used if the projection lens system contains only one crystal lens. In this case the lens is broken down into at least two lenses which are arranged so they are rotated in relation to one another. They can be joined by wringing them together. Another possibility is to first join individual layers of the desired crystal orientation optically seamlessly and in another step to manufacture the lens from the layers that have been joined together.

[0074] Figure 7 shows the lens cross section of a catadioptric projection lens system 711 for the wavelength 157 nm. The optical data for this lens system is summarized in Table 3. The exemplary embodiment is taken from the patent application PCT/EP 00/13148 by the present applicant and corresponds to Figure 9 or Table 8 there. For a detailed description of the functioning of the lens system, reference is made to that patent application PCT/EP 00/13148. All the lenses of this lens

system are made of calcium fluoride crystal. The image-side numeric aperture of the lens system is 0.8.

[0075] For the exemplary embodiment in Figure 7, the aperture angles θ and beam paths OP_L of the upper outermost aperture beam 713 and the lower outermost aperture beam 715 have been calculated for the individual lenses L801 through L817. The outermost aperture beams 713 and 715 emanate from the object point having the coordinates $x = 0$ mm and $y = -82.15$ mm and they have in the image plane angles with respect to the optical axis which correspond to the image-side numeric aperture. The upper and lower outermost aperture beams were calculated because this is an object field remote from the axis and thus the aperture beams do not run in symmetry with the optical axis as was the case for the outermost aperture beam of the exemplary embodiment in Figure 6.

[0076] Table 4 summarizes the data for the upper outmost aperture beam and Table 5 summarizes the data for the lower outermost aperture beam.

Table 4.

| Lens | Aperture angle θ ($^{\circ}$) | Beam path OP_L (mm) | Optical path difference (111) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^{\circ}$ (nm) | Optical path difference (111) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 60^{\circ}$ (nm) | Optical path difference (100) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^{\circ}$ (nm) | Optical path difference (100) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 45^{\circ}$ (nm) |
|-------|--|--------------------------|--|---|--|---|
| Total | | [see source for numbers] | | | | |

Table 5.

| Lens | Aperture angle θ (°) | Beam path OP_L (mm) | Optical path difference (111) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ (nm) | Optical path difference (111) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 60^\circ$ (nm) | Optical path difference (100) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 0^\circ$ (nm) | Optical path difference (100) lens $\alpha_{AR} - \alpha_L = 45^\circ$ (nm) |
|-------|-----------------------------|--------------------------|--|---|--|---|
| Total | | [see source for numbers] | | | | |

[0077] Table 4 and Table 5 show that the aperture angles θ for the lenses L815 through L817 are greater than 25° . Again in this exemplary embodiment, the lenses L815 through L817, which are closest to the image plane, have large aperture angles. The design of lenses L815 through L817 has achieved the result that the maximum aperture angle is equal to or less than

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ.$$

The maximum aperture angle for the outermost aperture beam is 30.8° for the lens L817.

[0078] The diameter of the aperture, which is between the lenses L811 and L 812, is 193 mm. The diameters of the lenses L815 through L817 are all smaller than 162 mm. Thus the diameters of these lenses, which have high aperture angles, amount to less than 85% of the aperture diameter.

[0079] Table 4 and Table 5 show that it is advantageous for lenses with large aperture angles to orient them in the (100) direction because the birefringence values are lower on the whole. For example, the optical path differences of the lenses L815 through L817 are more than 20% lower.

[0080] On the basis of the exemplary embodiment in Figure 7, it will be shown below how the intrinsic birefringence can be largely compensated by the parallel use of groups of (100) lenses rotated in opposite directions and groups of (111) lenses rotated in opposite directions.

[0081] First all the calcium fluoride is incorporated in the (111) orientation without opposite rotation of the (111) lenses. In this case, a maximum optical path difference for two mutually orthogonal linear polarization states of 136 nm is obtained. By rotating the (111) lenses, the maximum optical path difference can be reduced to approximately 38 nm. To do so, the lenses L801 and L804 are combined into one group and the lenses L802 and L803 are combined into another group, with the angle of rotation between the lenses amounting to 60° in each case. The lenses L808, L809 and L810 are combined into a group of three and the lenses L815, L816 and L817 are combined into another group of three with the angle of rotation between two of these lenses amounting to 40° in each case. The lenses L811, L812, L813 and L814 are combined into a group of four with an angle of rotation of 30° each.

[0082] If all the calcium fluoride is incorporated in the (100) orientation without opposite rotation of the (100) lenses, the result is a maximum optical path difference for two mutually orthogonal linear polarization states of 90.6 nm. By rotating the (100) lenses, the maximum optical path difference can be reduced to approximately 40 nm. To do so the lenses L801 and L804 are combined into one group and the lenses L802 and L803 are combined into another group, whereby the angle of rotation between the lenses amounts to 45° in each case. The lenses L808, L809 and L810 are combined into one group of three and the lenses L815, L816 and L817 are combined into another group of three, with the angle of rotation between two of these lenses amounting to 30°. The lenses L811, L812, L813 and L814 are combined into a group of four with an angle of rotation of 22.5°.

[0083] A maximum optical path difference for two mutually orthogonal linear polarization states of 7 nm is obtained when groups with (100) lenses are combined with groups with (111) lenses. To do so the lenses L801 and L804 are combined into a group of (111) lenses, where the angle of rotation between the lenses is 60°. The lenses L802 and L803 are combined into a group of (100) lenses, where the angle of rotation between the lenses is 45°. The lenses L808, L809 and L810 are combined into a group of three (100) lenses, where the angle of rotation between two of these lenses amounts to 30°. The lenses L815, L816 and L817 are combined into a group of three (111) lenses, where the angle of rotation between two of these lenses amounts to 40°. The lenses L811, L812, L813 and L814 are combined into a group of four (100) lenses with an angle of rotation of 22.5°, respectively. The lens axes of the lenses L805 and L807 which are not combined into a group are oriented in the <111> crystal direction, while the lens axis of the lenses [sic; lens] L806 is oriented in the <100> crystal direction.

[0084] To compensate for birefringence of crystals in the UV, crystal elements with different orientations of the crystal axes can be arranged in succession. If lenses with different crystal directions are arranged in succession in an optical system, this results in the problem that frequently the light must pass through lenses having different angles, and then compensation may be possible only to a limited extent. In the case of lens systems having only one crystal lens, this type of compensation is not even possible.

[0085] One possible solution is to split a lens by design into two parts and to wring them so they are rotated in opposite directions. On a practical level, this method suffers from stresses which deform the fit and it suffers from the fact that the two halves must be positioned laterally with an accuracy in the micrometer range.

[0086] It has been proposed that blanks be produced from single layers that are rotated in opposite directions with regard to the orientation of the crystal axes and then are wrung to one another and then these blanks are cut to form a lens and polished. All the statements made above regarding the orientation also apply here. In addition to the classical wringing of optics production, all other joining techniques with intimate contact and the lowest possible introduction of stress are possible and are covered by the present invention. The wringing may be supported in particular by layers of quartz glass, for example. It is important for no interfering refraction or reflection at occur at the joint.

[0087] The choice of orientation is based on the rules described above.

[0088] On the basis of Figure 8, the basic design of a microlithography projection exposure system is described. The projection exposure system 81 has an illumination device 83 and a projection lens system 85. The projection lens system 85 includes a lens arranged 819 with an aperture AP, an optical axis 87 being defined by the lens arrangement 89. Exemplary embodiments of the lens arrangement 89 are shown in Figure 6 and Figure 7. A mask 89 is situated between the illumination device 83 and the projection lens system 85 and is held in the beam path by means of a mask holder 811. Such masks 89 that are used in microlithography have a micrometer-nanometer structure, which is reduced by a factor of 4 or 5 by means the projection lens system 85 and then is imaged on a screen 813. A light sensitive substrate 815, e.g., a wafer, which is positioned by a substrate holder 817, is held in the image plane 813.

[0089] The minimal structures that can still be resolved depend on the wavelength λ of the light used for illumination and on the image-side numeric aperture of the projection lens system 85, whereby the maximum achievable resolution of the projection exposure system 81 increases with a decrease in wavelength λ of the illumination system 83 and with an increase in the image-side numeric aperture of the projection lens system 85. Resolutions of less than 150 nm can be achieved with the exemplary embodiments depicted in Figures 6 and 7. Therefore, effects such as the intrinsic birefringence must also be minimized. This invention makes it possible to greatly reduce the interfering influence of the intrinsic birefringence, especially in the case of projection lens systems having large image-side numeric apertures.

Table 1.

M1587a

| Lens | Radius | Thickness | Glass | Refractive index at 157.629 nm | $\frac{1}{2}$ free diameter |
|------|--------|--------------------------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | | [see source for numbers] | | | |

Wavelength and refractive index are given with respect to a vacuum

Aspheric constants

Asphäre der Linse ... = Asphericity of the lens ...

[see source for numbers]

Table 3.

L61

| Lens | Radius | Thickness | Glass | Refractive index at 157.13 nm | $\frac{1}{2}$ free diameter |
|------|--------|--------------------------------|-------|----------------------------------|-----------------------------|
| | | [see source for numbers] | | | |

Aspheric constants

Asphäre der Linse ... = Asphericity of the lens ...

[see source for numbers]

Patent Claims

1. Projection lens system (611, 711) for a microlithographic projection exposure system (81) having a plurality of lenses (L601-L630, L801-L817) whereby at least one lens (1) consists of a fluoride crystal, characterized in that at least one lens (1) is a (100) lens with a lens axis (EA) which is approximately normal to the {100} crystal planes or to the equivalent crystal planes of the fluoride crystal.
2. Projection lens system according to Claim 1, whereby the (100) lens is a rotationally symmetrical lens with an axis of symmetry, and the axis of symmetry coincides with the lens axis of the (100) lens.
3. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 2 with an optical axis (OA), where the lens axis of the (100) lens coincides with the optical axis of the projection lens system.
4. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 3, whereby light beams run from an object plane (O) to an image plane (O') within the projection lens system, and at least one light beam (609, 713, 715) within the (100) lens has an aperture angle with respect to the lens axis greater than 25°, in particular greater than 30°.
5. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 4, whereby within the projection lens system, light beams runs from an object plane to an image plane and all the light beams within the (100) lens have aperture angles with respect to the lens axis amounting to a maximum of 45°, in particular a maximum of

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

where NA denotes the image-side numeric aperture and n_{FK} denotes the refractive index of the fluoride crystal.

6. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 5 with an aperture plane, where the aperture plane has an aperture diameter and the (100) lens has a lens diameter, the lens diameter amounting to less than 85%, in particular less than 80% of the aperture diameter.
7. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 6 with an image plane, with the (100) lens (L630-L817) being the lens closest to the image plane.

8. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 7, whereby a beam bundle emanates from an object point within an object plane, having beams with an azimuth angle α and an aperture angle θ , whereby the beam bundle has a birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ in an image plane and the (100) lenses are arranged so they are rotated in relation to one another about the optical axis so that the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with a non-rotated arrangement of the (100) lenses.

9. Projection lens system according to Claim 8, whereby the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has birefringence values $\Delta n(\theta_0, \alpha)$ for a given aperture angle θ_0 as a function of the azimuth angle α such that they vary by less than 20%.

10. Projection lens system according to any one of Claims 8 through 9, whereby the (100) lenses have reference directions which are normal to the lens axes and point in a main crystal direction, angles of rotation β being defined between the reference directions of the individual (100) lenses, with the following equation holding for the angle of rotation β between two (100) lenses of a group of n (100) lenses:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

where n is the number of (100) lenses of the group and m is an integer.

11. Projection lens system according to Claim 10, whereby an outermost aperture beam (609, 713, 715) of the beam bundle within the (100) lenses has an azimuth angle α_L and an aperture angle θ_L and the aperture angles θ_L within the (100) lenses of the group vary by a maximum of 30%, in particular by 20%.

12. Projection lens system according to any one of Claims 10 through 11, whereby an outermost aperture beam (609, 713, 715) of the beam bundle travels a beam path OP_L within the (100) lenses and the beam paths OP_L within the (100) lenses of the group vary by a maximum of 30%, in particular, 20%.

13. Projection lens system according to any one of Claims 10 through 12, whereby an outermost aperture beam (609, 713, 715) of the beam bundle within the (100) lenses experiences an optical path difference between two mutually orthogonal linear polarization states and the optical path differences

determined at angles of rotation $\beta = 0^\circ$ within the (100) lenses of the group vary by a maximum of 30%, in particular 20%.

14. Projection lens system according to any one of Claims 9 through 13, whereby the second group includes two (100) lenses.

15. Projection lens system according to Claim 14, whereby the two (100) lenses (L629, L630) are arranged adjacent to one another, in particular being wrung against one another.

16. Projection lens system according to any one of Claims 9 through 15, whereby the projection lens system has at least two groups with (100) lenses rotated oppositely from one another.

17. Projection lens system for a microlithographic projection exposure system with a plurality of lenses whereby at least two lenses consist of a fluoride crystal, whereby the at least two lenses are (111) lenses in which the lens axes are approximately normal to the {111} crystal planes or to the equivalent crystal planes of the fluoride crystal and the (111) lenses are arranged so they are centered about the optical axis, whereby a beam bundle emanates from an object point within an object plane and has beams that each has an azimuth angle α and an aperture angle 0 [sic; θ] in the object plane, whereby the beam bundle has a birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ in the image plane and the (111) lenses are arranged so they are rotated in relation to one another about the optical axis so that the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with a non-rotated arrangement of the (111) lenses.

18. Projection lens system according to Claim 17, whereby the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has birefringence values $\Delta n(\theta_0, \alpha)$ for a given aperture angle θ_0 as a function of the azimuth angle α which vary by less than 20%.

19. Projection lens system according to any one of Claims 17 through 18, whereby the (111) lenses have reference directions which are orthogonal to the lens axes and point in a main crystal direction, angles of rotation γ between the reference directions of the individual (111) lenses, whereby the following equation holds for the angle of rotation γ between two (111) lenses of a group of k (111) lenses:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 8^\circ$$

where k indicates the number of (111) lenses of the group and l is an integer.

20. Projection lens system according to Claim 19, whereby an outermost aperture beam (609, 713, 715) of the beam bundle within the (111) lenses has an azimuth angle α_L and an aperture angle θ_L , the azimuth angle α_L and the aperture angle θ_L within the (111) lenses of the group varying by a maximum of 30%, in particular 20%.
21. Projection lens system according to any one of Claims 19 through 20, whereby an outermost aperture beam (609, 713, 715) of the beam bundle with the (100) lenses travels a beam path OP_L and the beam paths OP_L within the (111) lenses of the group vary by a maximum of 30%, in particular, 20%.
22. Projection lens system according to any one of Claims 19 through 21, whereby an outermost aperture beam (609, 713, 715) of the beam bundle within the (111) lenses experiences an optical path difference between two mutually orthogonal linear polarization states and the optical path difference within the (111) lenses of the group determined at angle of rotation $\beta = 0^\circ$ vary by a maximum of 30%, in particular 20%.
23. Projection lens system according to any one of Claims 19 through 22, whereby the second group includes two (111) lenses.
24. Projection lens system according to Claim 23, whereby the two (111) lenses (L629, L630) are arranged adjacent to one another, in particular being wrung against one another.
25. Projection lens system according to any one of Claims 19 through 24, whereby the projection lens system has at least two groups with (111) lenses rotated oppositely from one another.
26. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 16 and according to any one of Claims 17 through 25 whereby a beam bundle emanates from an object point within an object plane and has beams which each have an azimuth angle α and an aperture angle θ in the object plane, whereby the beam bundle has a birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ in an object plane and the (100) lenses and the (111) lenses are rotated in relation to one another about the optical axis so that the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with a non-rotated arrangement of the (100) lenses and the (111) lenses.
27. Projection lens system according to Claim 26, whereby the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is made up of a (100) birefringence distribution $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$ which is produced by the (100) lenses and a (111) birefringence distribution $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$ which is produced by the (111) lenses, and

the maximum value of the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ amounts to a maximum of 20% of the maximum value of the (100) birefringence distribution $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$ or of the maximum value of the (111) birefringence distribution $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$.

28. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 27, whereby the fluoride crystal is a calcium fluoride crystal, a strontium fluoride crystal or a barium fluoride crystal.

29. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 28, whereby the projection lens system has an image-side numeric aperture NA and in the image-side numeric aperture NA is greater than 0.7, in particular greater than 0.8.

30. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 29, whereby the light beams have wavelengths smaller than 200 nm.

31. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 30, whereby the light beams have wavelengths smaller than 160 nm.

32. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 31, whereby the projection lens system (611) is a refractive lens system.

33. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 32, whereby the projection lens system is a catadioptric lens system (711) with lenses and at least one concave mirror (Sp2).

34. Projection lens system according to any one of Claims 1 through 33, whereby all the lenses are made of calcium fluoride.

35. Microlithographic projection exposure system (81) comprising an illumination system (83), a projection lens system (85) according to any one of Claims 1 through 19, imaging a structure-carrying mask (89) on a light-sensitive substrate (815).

36. Method of producing semiconductor components using a microlithographic projection exposure system (81) according to Claim 36 [sic; Claim 35?].

37. Method of reducing birefringence in a projection lens system for a microlithographic projection exposure system whereby the projection lens system comprises a plurality of lenses and at least two lenses are made of a fluoride crystal, whereby the at least two lenses are (100) lenses in

which the lens axes are approximately normal to the {100} crystal planes or to the equivalent crystal planes of the fluoride crystal and the (100) lenses are arranged so they are centered about the optical axis, characterized in that for a beam bundle emanating from an object point within an object plane and having beams each with an azimuth angle α and an aperture angle θ in the object plane, the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is determined in the image plane of the projection lens system and the (100) lenses are rotated about the optical axis so that the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with an arrangement of the (100) lenses that is not rotated.

38. Method of reducing birefringence with a projection lens system for a microlithographic projection exposure system whereby the projection lens system comprises a plurality of lenses and at least two lenses are made of a fluoride crystal, whereby the at least two lenses are (111) lenses in which the lens axes are approximately normal to the {111} crystal planes or to the equivalent crystal planes of the fluoride crystal and the (111) lenses are arranged so they are centered about the optical axis, characterized in that for a beam bundle emanating from an object point within an object plane and having beams each with an azimuth angle α and an aperture angle θ in the object plane, the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is determined in the image plane of the projection lens system and the (111) lenses are rotated about the optical axis so that the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with an arrangement of the (111) lenses that is not rotated.

39. Method of reducing birefringence with a projection lens system for a microlithographic projection exposure system whereby the projection lens system comprises a plurality of lenses and at least two lenses consist of a fluoride crystal, whereby the at least two lenses are (100) lenses in which the lens axes are approximately normal to the {100} crystal planes or to the equivalent crystal planes of the fluoride crystal and the (100) lenses are arranged so they are centered about the optical axis and at least two other lenses are made of a fluoride crystal whereby the at least two other lenses are (111) lenses in which the lens axes are approximately normal to the {111} crystal planes or to the equivalent crystal planes of the fluoride crystal and the (111) lenses are arranged so they are centered about the optical axis, characterized in that for a beam bundle which emanates from an object point within an object plane and has beams each with an azimuth angle α and an aperture angle θ in the object plane, the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is determined in the image plane of the projection lens system and the (100) lenses and the (111) lenses are rotated about the optical axis so that the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with a non-rotated arrangement of the (100) lenses and the (111) lenses.

40. Method according to Claim 39, whereby the birefringence distribution $\Delta n(\theta, \alpha)$ is made up of a (100) birefringence distribution $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$ which is produced by the (100) lenses and a (111) birefringence distribution $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$ which is produced by the (111) lenses, whereby the (100) lenses are rotated about the optical axis so that the (100) birefringence distribution $\Delta n_{(100)}(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with a non-rotated arrangement of the (100) lenses and whereby the (111) lenses are rotated about the optical axis so that the (111) birefringence distribution $\Delta n_{(111)}(\theta, \alpha)$ has greatly reduced values in comparison with a non-rotated arrangement of the (111) lenses.

41. Lens manufacturing method characterized in that several layers of crystal material usually rotated with regard to the crystal orientation, preferably fluoride crystal and in particular calcium fluoride, are joined together seamlessly optically, in particular being wrung together and then are cut and polished as a uniform blank.

42. Lens manufacturing method according to Claim 41, whereby two (111) layers are joined together optically seamlessly, their surface normal pointing in the <111> crystal direction or in equivalent crystal directions, whereby the (111) layers have reference directions which are normal to the surface normals and point in a main crystal direction, whereby an angle of rotation β is defined between the reference directions of the two (111) layers, the following equation holding for the angle of rotation β :

$$\beta = 60^\circ + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$$
, where m is an integer.

43. Lens manufacturing method according to Claim 42, whereby the (111) layers have approximately the same thickness.

44. Lens manufacturing method according to Claim 41, whereby two (100) layers are joined together optically seamlessly, their surface normal pointing in the <100> crystal direction or in equivalent crystal directions, whereby the (100) layers have reference directions which are normal to the surface normals and point in a main crystal direction, an angle of rotation γ being defined between the reference directions of the two (100) layers, where the following equation holds for the angle of rotation γ :

$$\gamma = 45^\circ + l \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$$
 where l is an integer.

45. Lens manufacturing method according to Claim 44, whereby the (100) layers have approximately the same thickness.

46. Lens manufacturing method according to Claim 40, whereby two (100) layers and two (111) layers are joined together optically seamlessly, whereby the surface normal of the (100) layers point in the <100> crystal direction or in crystal directions equivalent to that, and the surface normal of the (111) layers is pointing in the <111> crystal direction or the crystal directions equivalent to that, whereby the (100) layers and the (111) layers each have reference directions which are normal to the surface normals and point in a main crystal direction, an angle of rotation β being defined between the reference directions of the two (111) layers, where the following equation holding for the angle of rotation β :

$\beta = 60^\circ + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$ where m is an integer and

an angle of rotation γ being defined between the reference directions of the two (100) layers whereby the following equation holds for the angle of rotation γ :

$\gamma = 45^\circ + l \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ where l is an integer.

47. Lens manufacturing method according to Claim 46, whereby the (111) layers have approximately the same first thickness and the (100) layers have approximately the same second thickness and the ratio of the first thickness to the second thickness is 1.5 ± 0.2 .

48. Lens characterized by the fact that it is manufactured according to any one of Claims 41 through 47.

49. Projection system or projection exposure system for microlithography characterized in that it comprises a lens according to Claim 48.

50. Projection system or projection exposure system for microlithography according to at least one of Claims 1 through 40 characterized in that it comprises a lens according to Claim 48.

Plus 14 page(s) of drawings

Leerseite = blank page

Zeichnungen Seite = Page of Drawings

Nummer = Number

Offenlegungstag: 2. Januar 2003 = Disclosure date: January 2, 2003